

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική Διερεύνηση Συμπεριφοράς Πλαισίου Ο/Σ με Εμφατινόμενο
Τοίχωμα Ο/Σ Χαμηλής Αντοχής υπό Ανακυκλιζόμενη Οριζόντια Φόρτιση**



Επιμέλεια: **Κουτσελίνης Βασίλειος**

Επιβλέπων Καθηγητής: **Περδικάρης Φίλιππος** (αφυπηρετήσας)

Παπακωνσταντίνου Χρήστος

Βόλος, Οκτώβριος 2018

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική Διερεύνηση Συμπεριφοράς Πλαισίου Ο/Σ με Εμφατινόμενο
Τοίχωμα Ο/Σ Χαμηλής Αντοχής υπό Ανακυκλιζόμενη Οριζόντια Φόρτιση**

Επιβλέπων Καθηγητής: **Περδικάρης Φίλιππος** (αφυπηρετήσας)

Παπακωνσταντίνου Χρήστος

Εξεταστική επιτροπή: Παπακωνσταντίνου Χρήστος

Σοφιανόπουλος Δημήτριος

Κούτας Λάμπρος

Επιμέλεια: **Κουτσελίνης Βασίλειος**

Βόλος, Οκτώβριος 2018

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Φίλιππο Περδικάρη για την ευκαιρία που μου έδωσε να εντρυφήσω σε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και για την συνεχή καθοδήγηση από μέρους του, χωρίς την οποία η παρούσα εργασία δε θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί.

Λόγω αφυπηρέτησης, έγινε αντικατάσταση του κυρίου Περδικάρη ως επιβλέποντα από τον κύριο Παπακωνσταντίνου, τον οποίο ευχαριστώ για τη συμμετοχή του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Θεοχάρη Παπαθεοχάρη για την πολύτιμη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και για τους εποικοδομητικούς μας διαλόγους. Ευχαριστώ επίσης τον Δημήτρη Καραμπερόπουλο και τον Αλέκο Κουτσελίνη για την τεχνική και ηλεκτρονική υποστήριξη στο εργαστήριο.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους και συμφοιτητές μου, για τη στήριξή τους.

Πειραματική Διερεύνηση Συμπεριφοράς Πλαισίου Ο/Σ Με Εμφατνούμενο Τοίχωμα Ο/Σ Χαμηλής Αντοχής Υπό Ανακυκλιζόμενη Οριζόντια Φόρτιση

Κουτσελίνης Βασίλειος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2018

Επιβλέπων Καθηγητής: Περδικάρης Φίλιππος

Περίληψη

Η μέθοδος της εμφάντωσης πλαισίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο/Σ) με τοιχώματα διαφόρων τύπων και υλικών αποτελεί μία περίπτωση ενίσχυσης υφιστάμενης κατασκευής και εφαρμόζεται σε πλαίσια με κενό φάτνωμα μεταξύ των υποστυλωμάτων με στόχο την αύξηση της δυσκαμψίας και της σεισμικής αντίστασης του φορέα. Στην εργασία αυτή περιγράφεται η προετοιμασία και η εκτέλεση μιας πειραματικής δοκιμής ανακυκλιζόμενης οριζόντιας φόρτισης σε δοκίμιο πλαισίου Ο/Σ (Α8), ενισχυμένου με εμφατνούμενο τοίχωμα από Ο/Σ χαμηλής αντοχής, το οποίο αποτελεί φυσικό προσομοίωμα σε κλίμακα 1:3. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα αναλύονται και κατόπιν γίνεται αξιολόγηση των σχετικών διατάξεων του Ελληνικού Κανονισμού Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.), καθώς και άλλων διατάξεων από τη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων του δοκιμίου Α8 με τα αποτελέσματα τριών δοκιμών (Α4, Α6 και Α7) με παρόμοια γεωμετρία (λόγος ύψους προς μήκος τοιχώματος, $h_w/l_w=0.58$), που είχαν μελετηθεί παλαιότερα ως μέρος του ίδιου ερευνητικού προγράμματος. Τελικά, σε σχέση με τις προτεινόμενες μεθόδους ενίσχυσης πλαισίων Ο/Σ μέσω εμφάντωσης με τοιχώματα Ο/Σ στον ΚΑΝΕΠΕ, εξάγονται συμπεράσματα με βάση την συμπεριφορά του δοκιμίου Α8 καθώςον αφορά στην επίδραση της σύνδεσης του φαντώματος με το περιβάλλον πλαίσιο μέσω διατμητικών συνδέσμων με μεγαλύτερα μήκη αγκύρωσης, της ενίσχυσης των κόμβων του πλαισίου και της χρήσης χαμηλής αντοχής σκυροδέματος για το εμφατνούμενο τοίχωμα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας	2
1.2 Μελέτη βιβλιογραφίας.....	3
1.2.1 Altin et al. (1992).....	3
1.2.2 Aoyama et al. (1984).....	6
1.2.3 Kara and Altin (2006)	9
1.2.4 Higashi et al. (1980).....	13
Κεφάλαιο 2^ο : ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ...	16
2.1. Χαρακτηριστικά Δοκιμίου.....	16
2.1.1 Διαστάσεις και οπλισμός	16
2.1.2 Υλικά.....	21
2.2 Πειραματική Διάταξη	24
2.3 Ιστορία Φόρτισης	28
2.4 Μετρητικά Όργανα – Μετρήσεις	29
2.4.1 Μετακινήσεις	29
2.4.2 Ανηγμένες παραμορφώσεις	31
Κεφάλαιο 3^ο: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	33
3.1. Διαγράμματα Φορτίου-Μετακίνησης.....	33
3.2. Ρηγμάτωση – Είδος Αστοχίας	35
3.3. Ανηγμένες Παραμορφώσεις Οπλισμού και Σκυροδέματος	40
3.3.1. Παραμορφώσεις σκυροδέματος τοιχώματος	40
3.3.2. Παραμορφώσεις οπλισμού.....	54
3.3.3. Αξονικές παραμορφώσεις διατμητικών συνδέσμων.....	55
3.4. Διατμητική Παραμόρφωση Τοιχώματος και Πλαισίου.....	60

3.5. Σχετικές Μετακινήσεις Τοιχώματος με Περιβάλλον Πλαίσιο και Βάση Δοκιμίου	65
3.6. Πλαστιμότητα.....	74
3.7. Δυσκαμψία/Δυστημσία.....	76
3.8. Απορρόφηση Ενέργειας.....	77
Κεφάλαιο 4° : ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	80
4.1. Διαγράμματα Φορτίου-Μετακίνησης.....	80
4.2. Ανηγμένες Παραμορφώσεις Σκυροδέματος Τοιχώματος	80
4.3. Ανηγμένες Παραμορφώσεις Οπλισμού	83
4.4. Ανηγμένες Παραμορφώσεις Διατμητικών Συνδέσμων	83
4.5. Διατμητικές Παραμορφώσεις Τοιχώματος και Πλαισίου	85
4.6. Σχετικές Μετακινήσεις Τοιχώματος με Περιβάλλον Πλαίσιο και Βάση Δοκιμίου	88
4.7. Πλαστιμότητα - Δυσκαμψία/Δυστημσία.....	90
Κεφάλαιο 5° : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A8 ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	91
5.1 Φέρουσα Ικανότητα.....	91
5.1.1 Μοντέλο ΚΑΝ.ΕΠΕ.....	91
5.1.2 Μοντέλο FEMA 306.....	97
5.1.3 Μοντέλο ισοδύναμου ενιαίου τοιχώματος.....	100
5.2 Δυσκαμψία/Δυστημσία.....	101
5.2.1 Μοντέλο “shear-beam”	102
5.2.2 Μοντέλο ισοδύναμου διαγώνιου θλιπτήρα.....	103
Κεφάλαιο 6° : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A8 ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΙΩΝ A4, A6, A7	109
6.1 Χαρακτηριστικά Δοκιμίων A4, A6 και A7	109
6.2 Διαγράμματα φορτίου-μετακίνησης.....	111
6.3 Ρηγμάτωση – Είδος Αστοχίας	116

6.4 Διατμητική Παραμόρφωση Πλαισίου και Τοιχώματος.....	119
6.5 Δυσκαμψία/Δυστημψία.....	127
6.6 Πλαστιμότητα.....	129
6.7 Απορρόφηση ενέργειας	130
Κεφάλαιο 7° : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	136
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	139

Κεφάλαιο 1^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ενισχύσεις υφιστάμενων κατασκευών είναι ένα πολύ σημαντικό κεφάλαιο για τη χώρα μας, δεδομένου ότι η πλειοψηφία των υφιστάμενων κτηρίων στην Ελλάδα έχει μελετηθεί και κατασκευαστεί πριν το 1985, δηλαδή το έτος που πραγματοποιήθηκε η πρώτη σημαντική βελτίωση του ελληνικού αντισεισμικού κανονισμού του 1959. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την υψηλή σεισμική επικινδυνότητα του ελλαδικού χώρου, καταδεικνύει την ανάγκη ενίσχυσης των κτηρίων, ώστε να ανταπεξέρχονται στις αντισεισμικές απαιτήσεις που επιτάσσουν οι σύγχρονοι ισχύοντες κανονισμοί σχεδιασμού. Η ανάγκη αυτή οδήγησε το 2012 στην σύνταξη του Κανονισμού Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) σε κτήρια Ο/Σ, ο οποίος αποτελεί την ελληνική οδηγία και εργαλείο για τον πολιτικό μηχανικό για θέματα αποτίμησης συμπεριφοράς κτηρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα έναντι σεισμικών διεγέρσεων, καθώς και ενίσχυσης αυτών. Το περιεχόμενο του Κανονισμού αυτού αποτελεί αντικείμενο έρευνας, λόγω της συνεχούς εξέλιξης της τεχνολογίας και των μεθόδων ενίσχυσης.

Μία περίπτωση φορέα, ευάλωτου σε σεισμική καταπόνηση, που πολλές φορές χρήζει ενίσχυσης, είναι τα πλαίσια από οπλισμένο σκυρόδεμα, μεταξύ των υποστυλωμάτων των οποίων δεν παρεμβάλλεται κάποιου είδους τοιχοπλήρωση (για παράδειγμα στοιχεία τύπου pilotis) ή η τοιχοπλήρωση έχει υποστεί σοβαρές βλάβες. Ένα είδος ενίσχυσης σε αυτά τα στοιχεία είναι η μερική ή ολική πλήρωση του κενού φαντώματος του πλαισίου με σκοπό την αύξηση της δυσκαμψίας και της αντοχής του φορέα. Η πλήρωση μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους. Μερικά παραδείγματα είναι η προσθήκη μεταλλικών δικτυωτών συστημάτων, η προσθήκη προκατασκευασμένων τοιχωμάτων (panels), η κάλυψη με τοιχοποιία από συμπαγείς οπτόπλινθους ή τσιμεντόπλινθους και η πλήρωση με κατασκευή επί τόπου τοιχωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα (έγχυτο ή εκτοξευόμενο).

Η εμφάνιση πλαισίου με τοιχοποιία έχει ως αποτέλεσμα τη μέτρια αύξηση της φέρουσας ικανότητας (Koutromanos et al. 2012), ενώ η ενίσχυση με εμφαννόμενο τοίχωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντοχής, της πλευρικής δυσκαμψίας και σε ορισμένο βαθμό της πλαστιμότητας. Συνεπώς, η δεύτερη μέθοδος, η οποία είναι μια αξιόπιστη και σχετικά οικονομική λύση που προτείνεται και από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2012), συχνά προτιμάται έναντι της τοπικής ενίσχυσης στα φέροντα στοιχεία της υφιστάμενης κατασκευής (Fardis and Panagiotakos 1997, Chrysostomou et al. 2012).

1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Η εργασία αυτή πραγματεύεται την πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς ενός δοκιμίου πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος (Α8), ενισχυμένου με εμφαντούμενο τοίχωμα από Ο/Σ, το οποίο αποτελεί φυσικό προσομοίωμα σε κλίμακα 1:3. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο «Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος» του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκιμίου Α8 συγκρίνονται με τις προτάσεις των σχετικών διατάξεων του Ελληνικού Κανονισμού Ενισχύσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) και αξιολογείται η ικανότητα προτεινόμενων αναλυτικών μοντέλων της βιβλιογραφίας για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας και της δυσκαμψίας του. Επίσης, γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά αποτελέσματα τριών δοκιμών παρόμοιας γεωμετρίας (Α4, Α6 και Α7) που δοκιμάστηκαν παλιότερα στο ίδιο Εργαστήριο, τα οποία έχουν τον ίδιο λόγο διάτμησης εμφαντούμενου τοιχώματος ($\text{ύψος/μήκος} = h_w/l_w = 0.58$).

Τα δοκίμια αυτά αποτελούν τμήμα ερευνητικού προγράμματος του Εργαστηρίου «Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος», που είχε χρηματοδοτηθεί από τον Ο.Α.Σ.Π. (Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας). Τα προηγούμενα δοκίμια (Περδικάρης κ.α., 2012) αντιστοιχούν σε υφιστάμενα πλαίσια πριν το 1985, δηλαδή είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε ψαθυρή αστοχία. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί στο δοκίμιο Α8 η συμπεριφορά ενός εναλλακτικού σεναρίου ενίσχυσης, ενός σχετικά «ισχυρού» πλαισίου Ο/Σ που ενισχύεται με ένα σχετικά «αδύναμο» τοίχωμα Ο/Σ με σχετικά χαμηλή θλιπτική αντοχή.

Η ανάλυση που πραγματοποιείται εστιάζει και στην επίδραση στη συμπεριφορά του ενισχυμένου πλαισίου που παρουσιάζει η σύνδεση του φατνώματος Ο/Σ με το περιβάλλον πλαίσιο μέσω διατμητικών συνδέσμων με μεγαλύτερο από το προτεινόμενο του Κανονισμού μήκος αγκύρωσης και χωρίς την ενίσχυση των υποστλωμάτων με μανδύα Ο/Σ, χαρακτηριστικά τα οποία δεν έχουν μελετηθεί σε παρόμοιες πειραματικές έρευνες της διεθνούς βιβλιογραφίας.

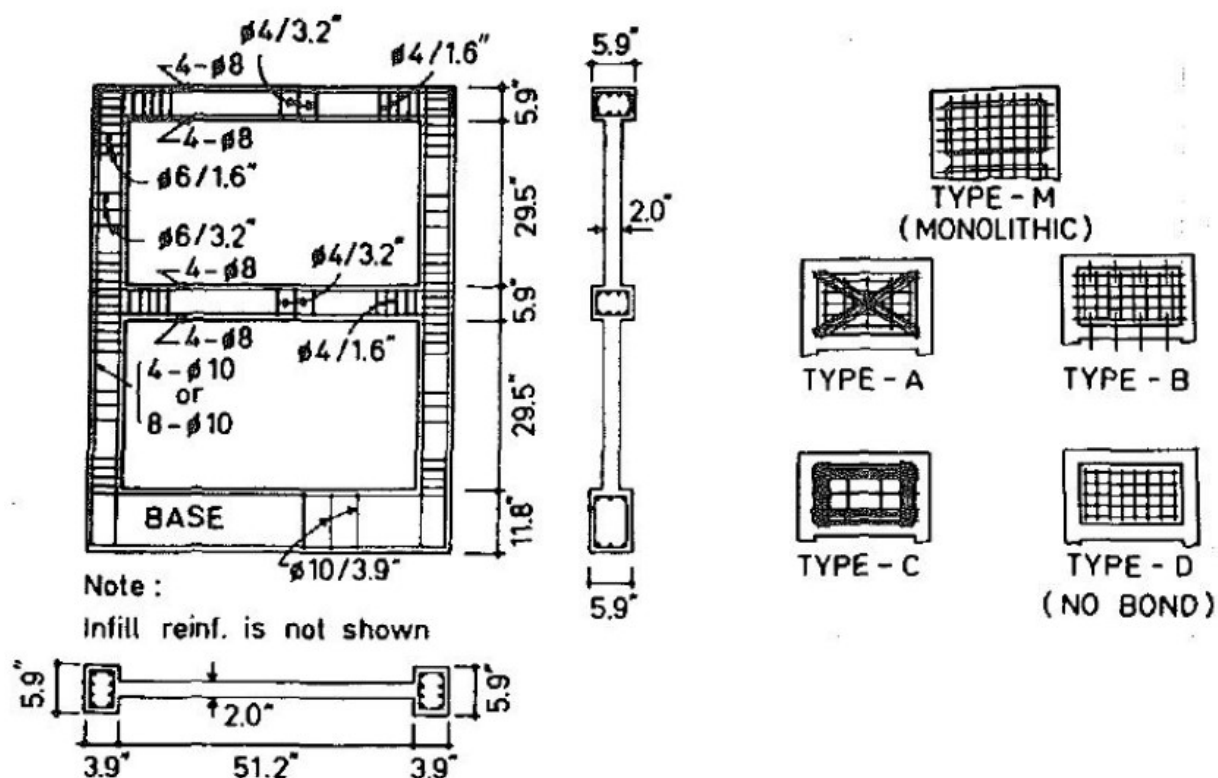
1.2 Μελέτη βιβλιογραφίας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά πειραματικές έρευνες από τη διεθνή βιβλιογραφία εμφάνισης πλαισίων από Ο/Σ με τοιχώματα Ο/Σ και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν.

1.2.1 Altin et al. (1992)

Σκοπός αυτής της πειραματικής έρευνας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς πλαισίων Ο/Σ, ενισχυμένα με εμφαντούμενα τοιχώματα από Ο/Σ, υπό τη δράση σεισμικών φορτίων. Δοκιμάζονται 14 πλαίσια 2 ορόφων και ενός ανοίγματος, με ισχυρές δοκούς και ασθενή υποστυλώματα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Χρησιμοποιούνται τέσσερις διαφορετικοί τύποι τοιχωμάτων. Οι μεταβλητές που εξετάζονται είναι η επίδραση του είδους της όπλισης του φατνώματος, της σύνδεσης πλαισίου-τοιχώματος, καθώς και της καμπτικής αντοχής των υποστυλωμάτων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επίδρασης του φατνώματος στη δυσκαμψία, την αντοχή, την απορρόφηση ενέργειας, την πλευρική μετακίνηση και την πλαστιμότητα του συστήματος. Επίσης διερευνήθηκε η επίδραση του κατακόρυφου θλιπτικού φορτίου και το ποσοστό διαμήκους οπλισμού στα τοιχώματα.

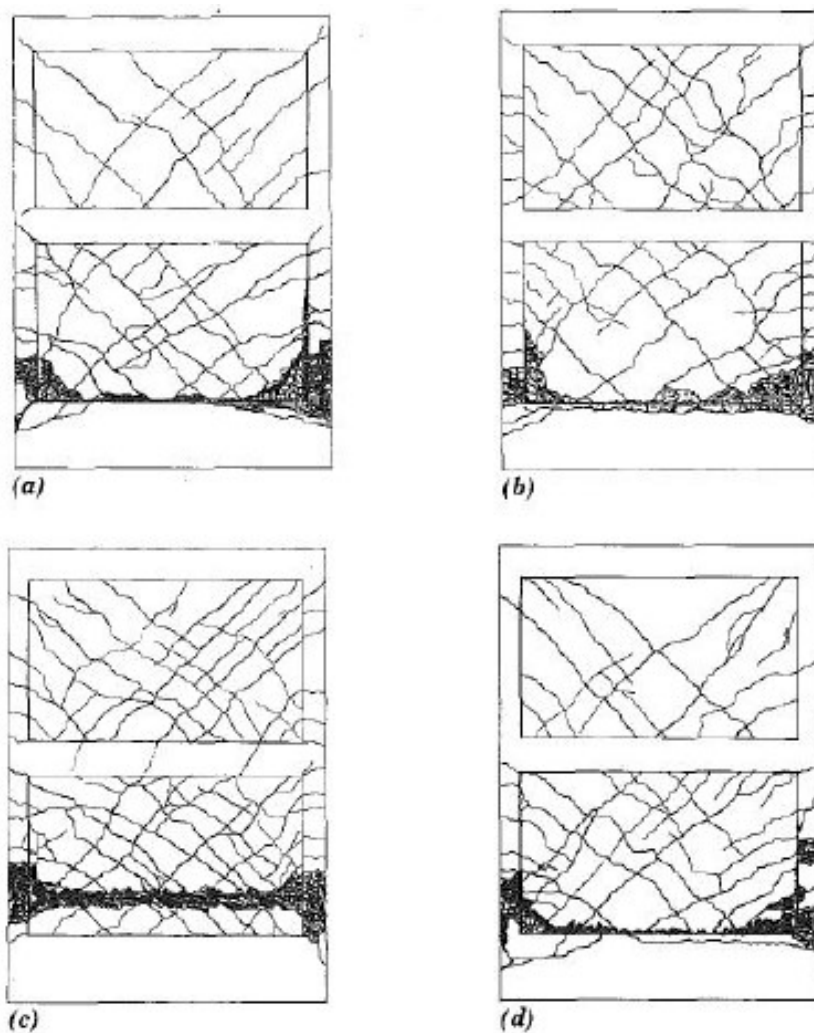
Οι τέσσερις διαφορετικοί τύποι τοιχωμάτων (βλ. Σχ. 1.1) είναι οι εξής. Στη διάταξη Α συγκολλήθηκαν διαγώνιες ράβδοι του τοιχώματος στον οπλισμό του πλαισίου. Στη διάταξη Β, οι κατακόρυφες ράβδοι οπλισμού του τοιχώματος ματίστηκαν σε διατμητικούς συνδέσμους που τοποθετήθηκαν στις δοκούς, ενώ οι οριζόντιες ράβδοι συγκολλήθηκαν στον οπλισμό του πλαισίου. Στη διάταξη C, ράβδοι οπλισμού που ήταν συγκεντρωμένοι στην περιοχή της περιμέτρου του τοιχώματος συγκολλήθηκαν στον οπλισμό του πλαισίου. Τέλος, η διάταξη D δεν περιλαμβάνει καμία σύνδεση μεταξύ φατνώματος και πλαισίου. Κάποια δοκίμια είχαν τον οπλισμό της διάταξης D στο τοίχωμα, ωστόσο όλες οι ράβδοι οπλισμού του τοιχώματος αγκυρώθηκαν καλά στο πλαίσιο και τα τοιχώματα σκυροδετήθηκαν ταυτόχρονα με το πλαίσιο. Τα δοκίμια αυτά ανήκουν σε μια διάταξη Μ (μονολιθικά δοκίμια) και λαμβάνονται ως δοκίμια αναφοράς. Στα 14 δοκίμια που μελετήθηκαν, περιλαμβάνεται και ένα γυμνό πλαίσιο.



Σχήμα 1.1 – Σχηματική απεικόνιση πλαισίου και διατάξεων οπλισμού τοιχωμάτων δοκιμίων (Altin et al., 1992).

Η πλευρική φόρτιση ασκήθηκε μόνο στη στάθμη του δεύτερου ορόφου. Σε τέσσερα δοκίμια μελετήθηκε η επίδραση σταθερού κατακόρυφου θλιπτικού αξονικού φορτίου.

Σε όλα τα ενισχυμένα δοκίμια, παρατηρήθηκε η εμφάνιση των πρώτων ρωγμών στα υποστυλώματα του 1^{ου} ορόφου. Σταδιακά παρουσιάστηκαν διαγώνιες ρωγμές στο τοίχωμα του 1^{ου} ορόφου και κατόπιν στο τοίχωμα του 2^{ου} ορόφου. Κοντά στο μέγιστο φορτίο παρατηρήθηκε διαχωρισμός του τοιχώματος και του πλαισίου σε όλα τα δοκίμια εκτός από τα μονολιθικά δοκίμια.



Σχήμα 1.2 – Εικόνες αστοχίας για α) δοκίμιο τύπου A, b) δοκίμιο τύπου B, c) μονολιθικό δοκίμιο και d) δοκίμιο τύπου C (Altin et al., 1992).

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παραπάνω πειραματική έρευνα συνοψίζονται στα εξής:

- Η ενίσχυση υφιστάμενων πλαισίων Ο/Σ έναντι σεισμικής δράσης με τη χρήση εμφαντούμενων τοιχωμάτων από Ο/Σ φαίνεται να είναι πολύ αποτελεσματική. Τα φατνώματα αυξάνουν την αντοχή και τη δυσκαμψία σημαντικά στη περίπτωση πλευρικών οριζόντιων φορτίων, με τη προϋπόθεση ότι αυτά είναι σωστά συνδεδεμένα με το πλαίσιο. Όλα τα μονολιθικά δοκίμια και τα δοκίμια με εμφαντούμενο τοίχωμα αστόχησαν με ένα μηχανισμό συνδυασμένης κάμψης και διάτμησης με ολίσθηση κοντά στο επίπεδο της δοκού θεμελίωσης.
- Η αύξηση στην καμπτική αντοχή των υποστυλωμάτων οδήγησε σε αύξηση της αντοχής σε πλευρικά φορτία των ενισχυμένων πλαισίων με εμφαντούμενο τοίχωμα.

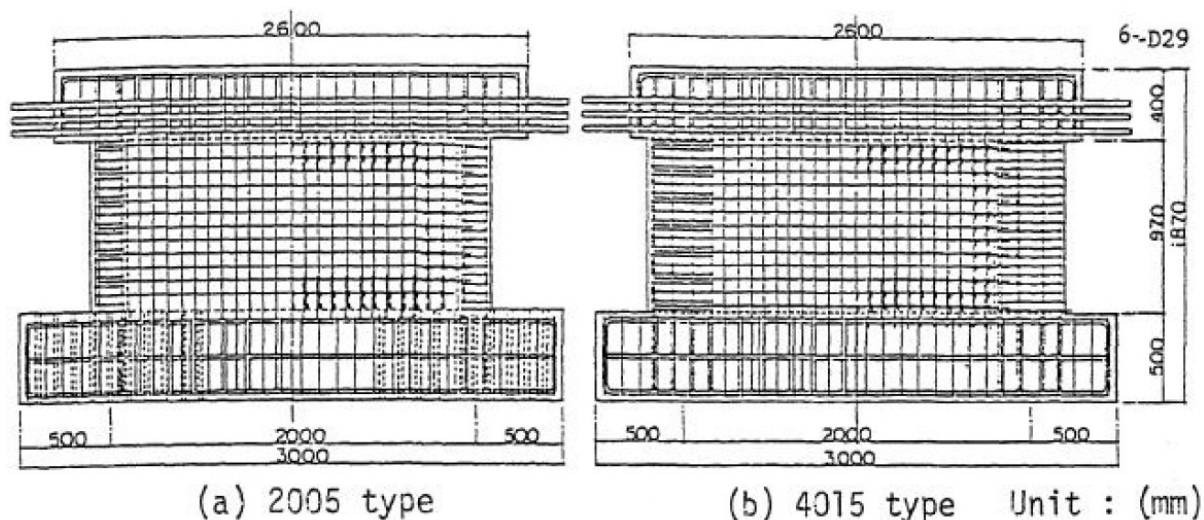
Επιπρόσθετα, η ταυτόχρονη δράση αξονικών κατακόρυφων θλιπτικών φορτίων οδήγησε επίσης με σημαντική αύξηση της αντοχής.

- Τα φαινόμενα καθίστανται μη αποτελεσματικά σε καθεστώς ανακυκλιζόμενης φόρτισης όταν δεν συνδέονται με το πλαίσιο. Στις περιπτώσεις αυτές παρατηρείται σημαντική πτώση αντοχής και δυσκαμψίας με τη πρόοδο της ανακυκλιζόμενης φόρτισης.
- Διαπιστώθηκε ότι τα ενισχυμένα πλαίσια συμπεριφέρθηκαν σχεδόν ελαστικά μέχρι το μέγιστο φορτίο. Πέρα από αυτό, ήταν ικανά να απορροφήσουν σημαντικές ποσότητες ενέργειας στο φθίνοντα κλάδο απόκρισης. Τα δοκίμια στα οποία εξασφαλίστηκε η συνέχεια των ράβδων οπλισμού του τοιχώματος στις δοκούς με τη χρήση βλήτρων, απορρόφησαν σχεδόν την ίδια ενέργεια με τα μονολιθικά δοκίμια.
- Η πρόσθεση εμφανιζόμενων τοιχωμάτων στα πλαίσια μιας κατασκευής έχει ως επακόλουθο σημαντικές αλλαγές στα δυναμικά χαρακτηριστικά της. Γενικά η πρόσθεση αυτή αυξάνει σημαντικά τη δυσκαμψία, συνεπώς η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής μειώνεται.

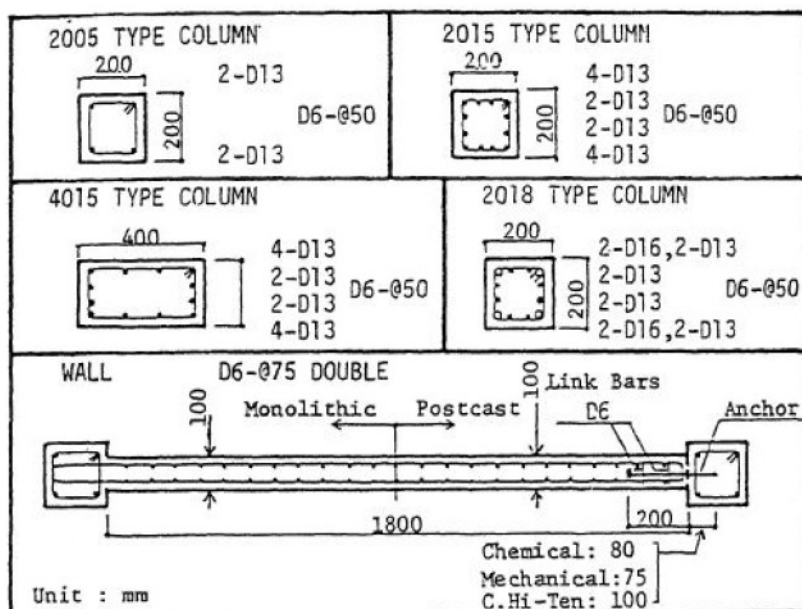
1.2.2 Aoyama et al. (1984)

Στην πειραματική έρευνα των Aoyama et al. κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε ανακυκλιζόμενη πλευρική φόρτιση δώδεκα (12) μονώροφα δοκίμια ενός ανοίγματος σε κλίμακα 1:3. Δόθηκε έμφαση στη κατασκευή της άνω δοκού ώστε να είναι πολύ δύσκαμπτη και ισχυρή. Σκοπός της έρευνας ήταν η διερεύνηση: (1) του βαθμού περισφιγξης που προσφέρει το περιβάλλον πλαίσιο στο εμφανιζόμενο τοίχωμα, (2) του τρόπου αστοχίας ανάλογα με την καμπτική και διατμητική αντοχή του δοκιμίου, (3) της επίδρασης της παρουσίας ανοιγμάτων στα τοιχώματα, (4) της μεθόδου σκυροδέτησης του τοιχώματος και της σύνδεσής του με το υφιστάμενο πλαίσιο.

Χρησιμοποιήθηκαν 3 μέθοδοι σκυροδέτησης και σύνδεσης του τοιχώματος με το περιβάλλον πλαίσιο. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν: Μονολιθικά δοκίμια αναφοράς (P) (ταυτόχρονη σκυροδέτηση πλαισίου και τοιχώματος), δοκίμια με χρήση μηχανικών αγκυρίων για τη σύνδεση τοιχώματος και πλαισίου (M) και δοκίμια με χρήση χημικών αγκυρίων (εποξειδική κόλλα) (C). Στα δοκίμια (C) χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι χημικών αγκυρίων: κανονικά (C) και υψηλής αντοχής (CH).

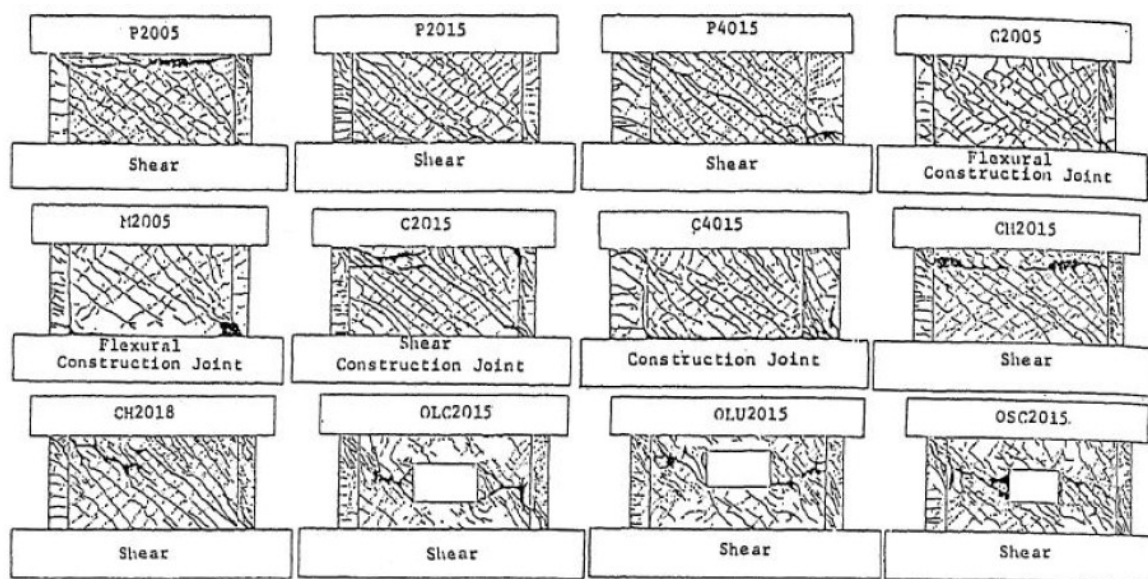


Σχήμα 1.3 – Διαστάσεις πλαισίων (Aoyama et al., 1984).



Σχήμα 1.4 – Διατομές υποστυλωμάτων και τοιχώματος δοκιμών (Aoyama et al., 1984).

Εκτός της οριζόντιας ανακυκλιζόμενης φόρτισης, επιβλήθηκε σε κάθε υποστύλωμα κατακόρυφο θλιπτικό αξονικό φορτίο 117 kN. Οι πειραματικές μετρήσεις περιλάμβαναν οριζόντιες μετακινήσεις, στροφές των υποστυλωμάτων, διαγώνιες παραμορφώσεις, σχετική ολίσθηση του τοιχώματος με τις δοκούς και ανηγμένες παραμορφώσεις των οπλισμών τοιχώματος και υποστυλωμάτων. Στο Σχ. 1.5 φαίνεται η τελική εικόνα αστοχίας όλων των δοκιμών μετά το πέρας της δοκιμής.



Σχήμα 1.5 – Εικόνα αστοχίας δοκιμίων μετά το πέρας των δοκιμών (Aoyama et al., 1984).

Παρατηρήθηκε ότι στο μέγιστο φορτίο, στο τοίχωμα όλων των δοκιμίων αναπτύχθηκαν εκτεταμένες διατμητικές ρωγμές. Στα δοκίμια με τοίχωμα χωρίς ανοίγματα διαπιστώθηκε στο μέγιστο φορτίο σύνθλιψη του σκυροδέματος στο πάνω μέρος του τοιχώματος και στο θλιβόμενο υποστύλωμα. Στα δοκίμια με μικρά υποστυλώματα (C2005) παρατηρήθηκαν εκτεταμένες καμπτικές ρωγμές στη βάση τους. Τα δοκίμια με τοιχώματα που είχαν άνοιγμα εμφάνισαν εκτεταμένες βλάβες στις δύο πλευρές του ανοίγματος και στην κορυφή των υποστυλωμάτων. Στον τελευταίο κύκλο φόρτισης τα δοκίμια C2005 και M2005 αστόχησαν κυρίως σε κάμψη, με εξόλκευση των ράβδων ένωσης στη βάση του τοιχώματος. Τα δοκίμια με ανοίγματα αστόχησαν λόγω διάτμησης στις δύο πλευρές του ανοίγματος, αστοχία που επεκτάθηκε και στα παρακείμενα υποστυλώματα.

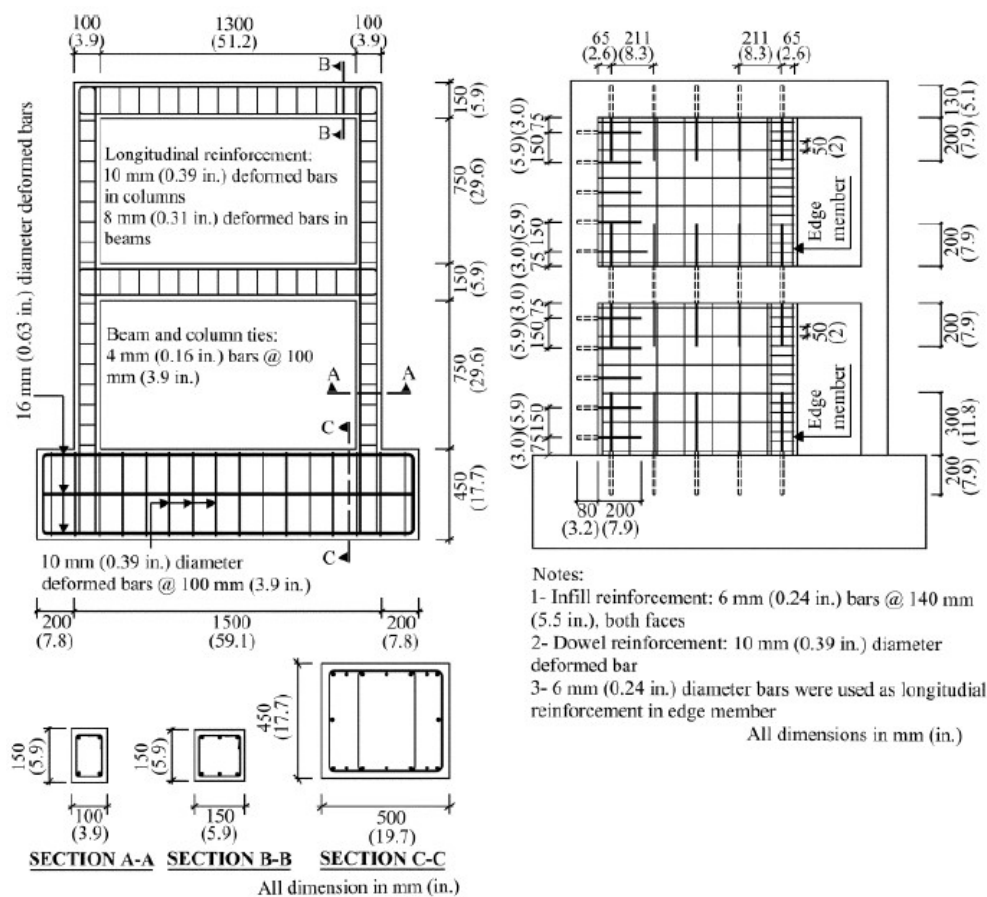
Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την πειραματική έρευνα συνοψίζονται στα εξής:

- Η διατμητική αντοχή αυξάνεται με την αύξηση της περίσφιγξης που προσδίδει το περιβάλλον πλαίσιο, τόσο για τα δοκίμια με εμφαννόμενο τοίχωμα όσο και για τα μονολιθικά δοκίμια.
- Η αντοχή σε διάτμηση των δοκιμίων με εμφαννόμενο τοίχωμα ήταν μικρότερη από αυτή των αντίστοιχων μονολιθικών. Ωστόσο, η αύξηση της περίσφιγξης λόγω του περιβάλλοντος πλαισίου θα μπορούσε να βοηθήσει στην εξάλειψη αυτού του μειονεκτήματος.

- Τα εμφανιζόμενα τοιχώματα μπορεί να αστοχήσουν λόγω ολίσθησης κατά μήκος της διεπιφάνειας του παλαιού με το νέο σκυρόδεμα, αλλά με την ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων.
- Η συμπεριφορά των χημικών αγκυρίων ήταν εν γένει ικανοποιητική και ανώτερη της συμπεριφοράς των μηχανικών αγκυρίων.
- Η διατμητική αντοχή των εμφανιζόμενων τοιχωμάτων με ανοίγματα θα μπορούσε να εκτιμηθεί με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που χρησιμοποιείται στην περίπτωση των μονολιθικών τοιχωμάτων.








1.2.3 Kara and Altin (2006)

Σκοπός αυτής της πειραματικής έρευνας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς μη πλάστιμων πλαισίων Ο/Σ ενισχυμένων με μερική εμφάντωση τοιχώματος, σε ανακυκλιζόμενη οριζόντια φόρτιση. Κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν επτά (7) διώροφα δοκίμια ενός ανοίγματος σε κλίμακα 1:3. Το δοκίμιο 1 αποτελεί πλαίσιο χωρίς εμφάντωση με τοίχωμα. Το δοκίμιο 2 είναι πλαίσιο με εμφανιζόμενα τοιχώματα και στους δύο ορόφους. Στα υπόλοιπα δοκίμια τοποθετήθηκαν φατνώματα με διαφορετική διάταξη ανοιγμάτων για το καθένα. Μελετήθηκε η αντοχή, η δυσκαμψία, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και οι μηχανισμοί αστοχίας όλων των δοκιμίων.



Σχήμα 1.6 – Σχηματική απεικόνιση πλαισίου και διάταξη οπλισμών δοκιμίων (Kara and Altin, 2006).

Πίνακας 1.1 – Διάταξη τοιχωμάτων στα διάφορα δοκίμια (Kara and Altin, 2006).

Specimen No.	Configurations	Infill*			f_c , MPa (ksi)	
		l_w , mm (in.)	h_w , mm (in.)	l_w/h_w	Frame	Infill
1		—	—	—	12.2 (1.8)	—
2		1300 (51.2)	750 (29.6)	1.73	13.4 (1.9)	26.0 (3.8)
3		325 (12.8)	750 (29.6)	0.43	12.0 (1.7)	25.7 (3.7)
4		650 (25.6)	750 (29.6)	0.87	14.0 (2.0)	26.2 (3.8)
5		975 (38.4)	750 (29.6)	1.30	12.4 (1.8)	27.0 (3.9)
6		2-487.5 (2-19.2)	750 (29.6)	1.30	13.6 (2.0)	27.7 (4.0)
7		650 (25.6)	750 (29.6)	0.87	14.5 (2.1)	26.8 (3.9)

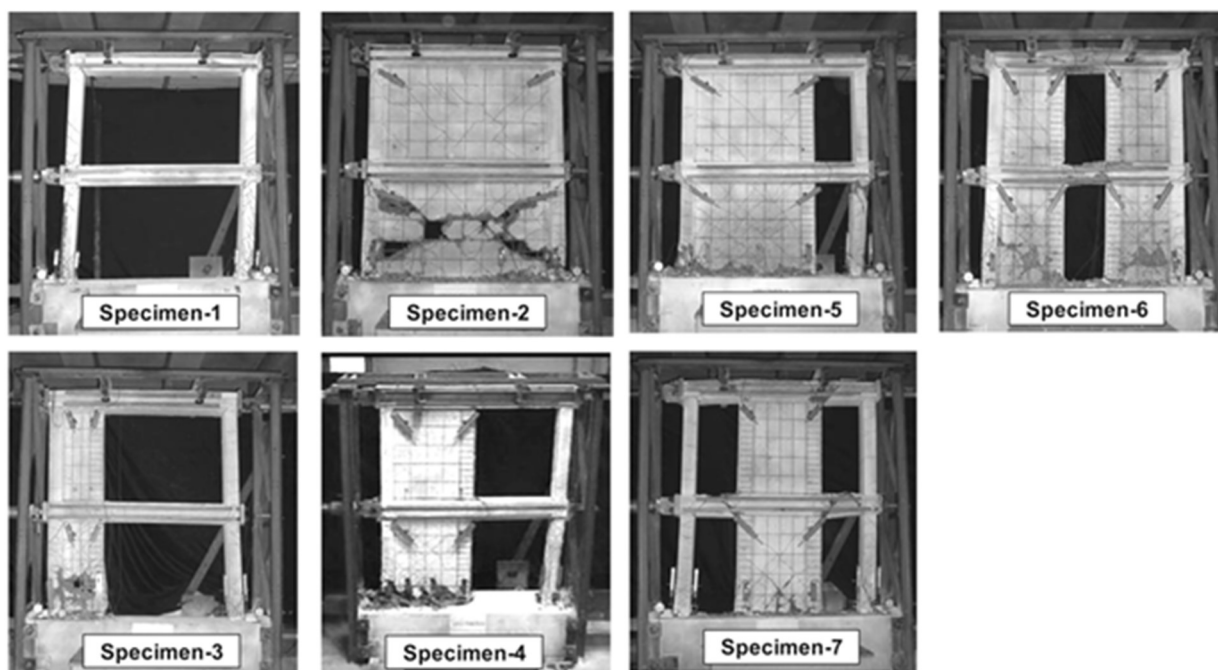
*Marks indicate infills. Infill thickness $b_w = 50$ mm (1.97 in.); l_w = infill length; and h_w = infill height.

Τα πειραματικά αποτελέσματα συνοψίζονται στα εξής:

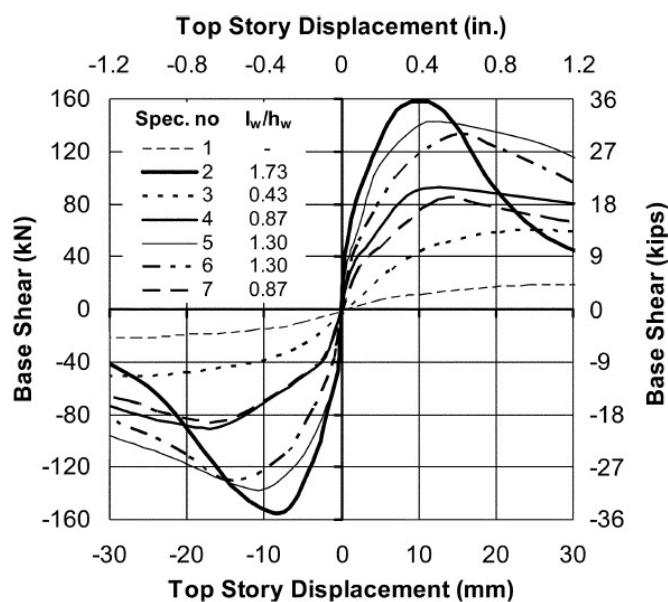
- Η εμφάνιση των δοκιμών με τοίχους Ο/Σ μείωσε σημαντικά την οριζόντια μετακίνηση και αύξησε τη φέρουσα ικανότητα και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.
- Τα δοκίμια με μερική εμφάνιση επέδειξαν πιο εύκαμπτη συμπεριφορά σχετικά με το δοκίμιο με πλήρη εμφάνιση.
- Η αύξηση του λόγου διαστάσεων των τοιχωμάτων, l_w/h_w , οδηγεί σε αύξηση της φέρουσας ικανότητας και της δυσκαμψίας/δυστημψίας των δοκιμών. Η φέρουσα ικανότητα των δοκιμών με ίδιο λόγο l_w/h_w ήταν περίπου ίδια.
- Το δοκίμιο 1, το οποίο ήταν πλαίσιο χωρίς τοίχωμα, αστόχησε λόγω μηχανισμού ορόφου, δηλαδή αστοχία συνδυασμού κάμψης και διάτμησης που παρατηρήθηκε στη

βάση των υποστυλωμάτων και διατμητική αστοχία στους κόμβους δοκού-υποστυλωμάτων.

- Στα εμφανωμένα δοκίμια παρατηρήθηκαν δύο τύποι αστοχίας: σύνθλιψη του κορμού του τοιχώματος στα δοκίμια 2, 3 και 6 και διατμητική ολίσθηση μεταξύ τοιχώματος και δοκού θεμελίωσης στα δοκίμια 4, 5 και 7.
- Στο δοκίμιο 2 (με πλήρως εμφανούμενο τοίχωμα) οι τέμνουσες δυνάμεις μεταφέρθηκαν μεταξύ τοιχώματος-πλαισίου μέσω των διαγώνιων θλιπτήρων και προκάλεσαν τη διατμητική αστοχία των άκρων των υποστυλωμάτων του πλαισίου.
- Στα δοκίμια 3, 4 και 5, τα υποστυλώματα του 1^{ου} ορόφου που δεν συνδέθηκαν με το τοίχωμα αστόχησαν λόγω διάτμησης στα άκρα τους.
- Τα συνοριακά στοιχεία στα ελεύθερα άκρα των τοιχωμάτων των δοκιμίων με μερική εμφάνιση εμπόδισαν τη μετάδοση των διατμητικών ρωγμών στις άκρες των τοιχωμάτων.
- Δεν παρατηρήθηκε διαχωρισμός μεταξύ πλαισίου και τοιχώματος σε κάποιο δοκίμιο.
- Στο δοκίμιο 2 (με πλήρη εμφάνιση), η διατμητική αστοχία των υποστυλωμάτων περιορίσε την φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου.



Σχήμα 1.7 – Εικόνα αστοχίας των δοκιμίων (Kara and Altin, 2006).

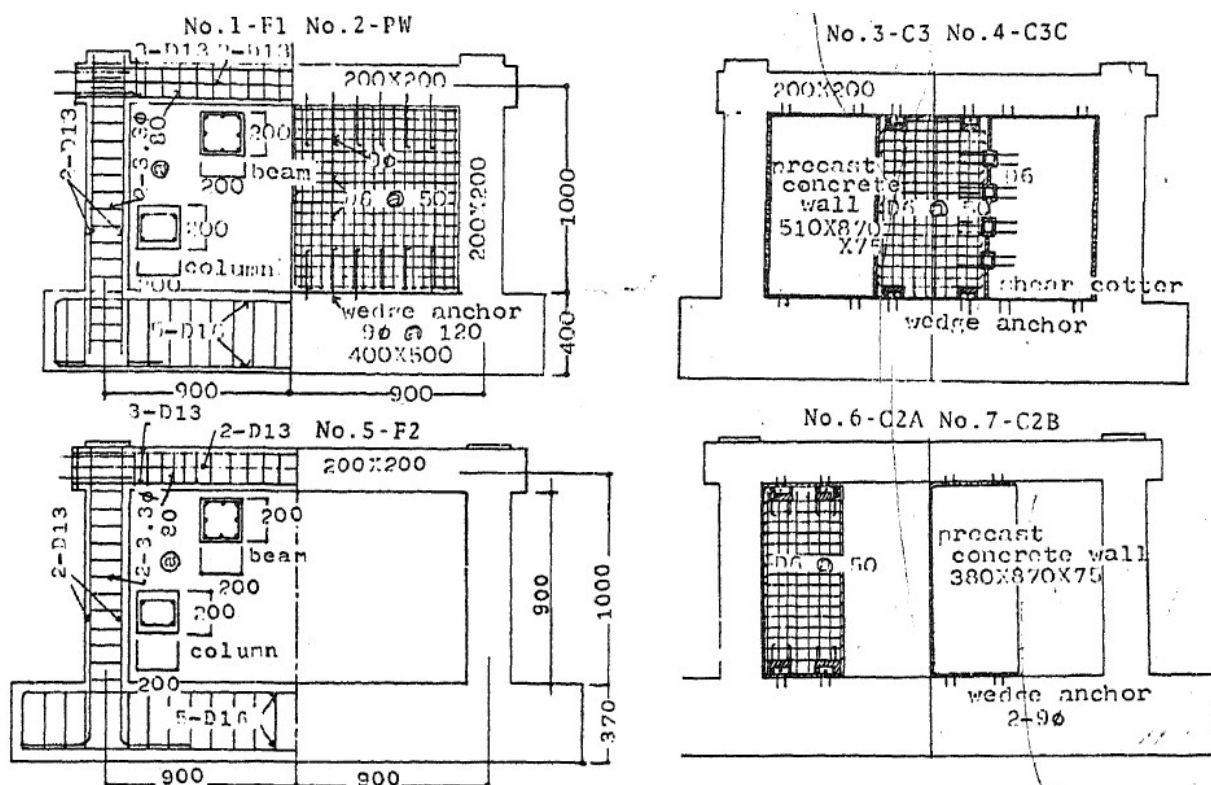


Σχήμα 1.8 – Περιβάλλουσες καμπύλες τέμνουσας βάσης-μετακίνησης (Kara and Altin, 2006).

1.2.4 Higashi et al. (1980)

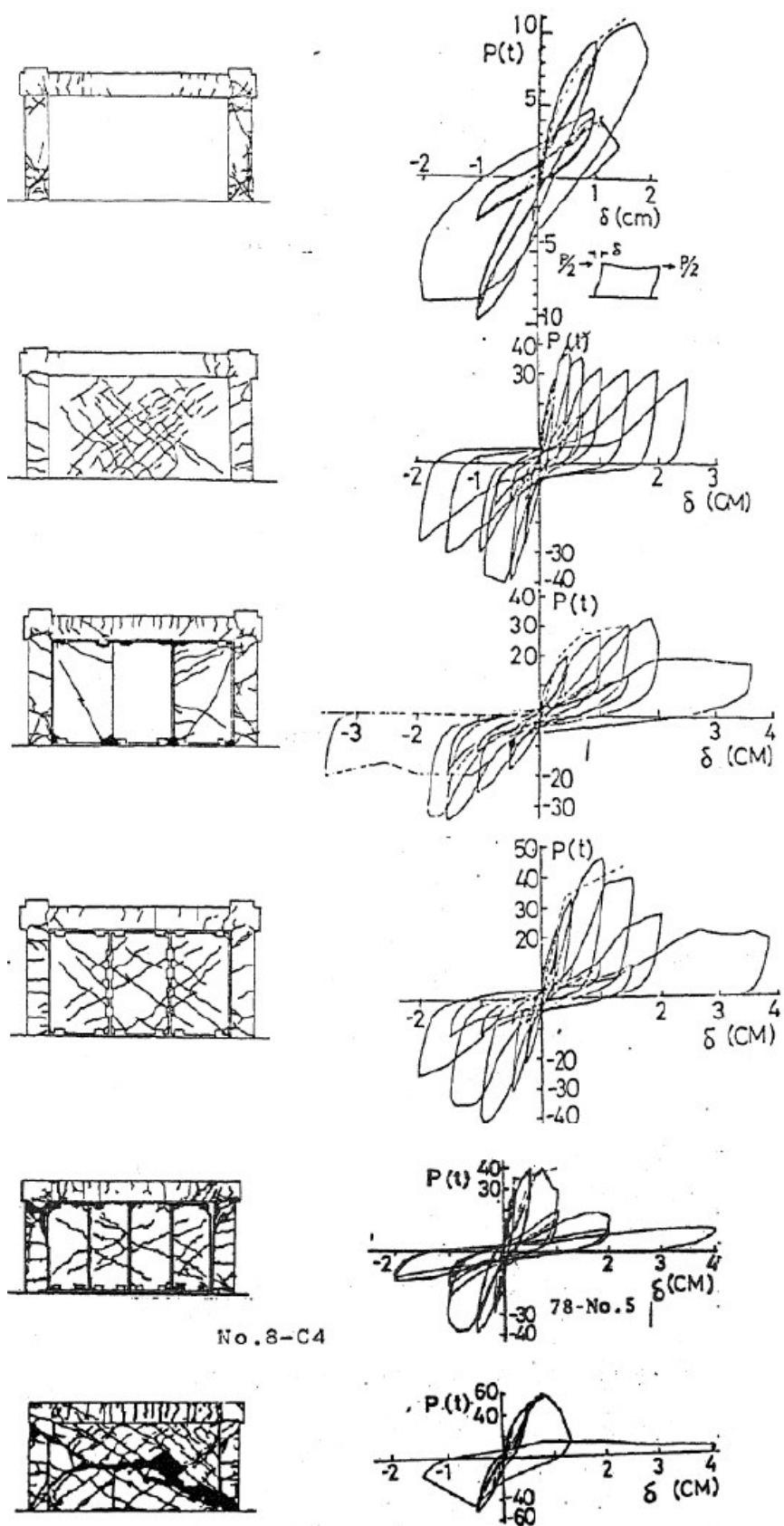
Σκοπός αυτής της πειραματικής έρευνας είναι η συμβολή στη βελτίωση των αντισεισμικών χαρακτηριστικών υφιστάμενων κατασκευών Ο/Σ χαμηλού ύψους, με την πειραματική διερεύνηση της ανελαστικής συμπεριφοράς δεκατριών (13) μονώροφων πλαισίων Ο/Σ ενός ανοίγματος και με χαμηλό ποσοστό συνδετήρων στα υποστυλώματα, ενισχυμένων με διάφορους τύπους φάτνωμάτων. Όλα τα δοκίμια είχαν κλίμακα 1:3. Οι τύποι ενισχύσεων που πραγματοποιήθηκαν είναι οι εξής: α) εμφατνούμενο τοίχωμα από οπλισμένο έγχυτο σκυρόδεμα, β) τοποθέτηση προκατασκευασμένου πάνελ από οπλισμένο σκυρόδεμα στο φάτνωμα του πλαισίου, γ) τοποθέτηση προκατασκευασμένου πάνελ από οπλισμένο σκυρόδεμα με ανοίγματα πόρτας, δ) τοποθέτηση χιαστί μεταλλικών στοιχείων, ε) ενίσχυση πλαισίου με μεταλλικό πλαίσιο και στ) ενίσχυση πλαισίου με μεταλλικό δικτύωμα.

Στο παρόν κείμενο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μόνον των πλαισίων με εμφάτνωση προκατασκευασμένων τοιχωμάτων ή τοιχωμάτων με έγχυτο σκυρόδεμα. Ανάμεσα στα 13 δοκίμια περιλαμβάνονται και 2 «γυμνά» πλαίσια, καθώς και ένα μονολιθικό δοκίμιο (πλαίσιο και τοίχωμα). Τα δοκίμια καταπονήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη οριζόντια φόρτιση.



Σχήμα 1.9 – Σχηματική απεικόνιση δοκιμίων (Higashi et al., 1980).

Όλα τα ενισχυμένα δοκίμια επέδειξαν φέρουσα ικανότητα μεταξύ αυτής του «γυμνού» πλαισίου και αυτής του μονολιθικού δοκιμίου. Παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια με το προκατασκευασμένο πάνελ και το δοκίμιο με το επί-τόπου σκυροδετούμενο τοίχωμα παρουσίασαν τη μεγαλύτερη αύξηση αντοχής σε οριζόντια φόρτιση (3 έως 4 φορές της αντοχής του «γυμνού» πλαισίου). Η τελική εικόνα αστοχίας και η καμπύλη φορτίου – μετακίνησης (P-δ) για τα δοκίμια φαίνεται στο Σχ. 1.10.



Σχήμα 1.10 – Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών (Higashi et al., 1980).

Κεφάλαιο 2^ο : ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

2.1. Χαρακτηριστικά Δοκιμίου

Το υπό μελέτη δοκίμιο A8 αποτελεί ένα πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος, το οποίο ενισχύθηκε με εμφαννόμενο τοίχωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα και κατασκευάστηκε σε κλίμακα 1:3. Η εμφάνιση έλαβε χώρα μετά παρέλευση 2 μηνών από τη σκυροδέτηση του πλαισίου (προσομοίωση της ενίσχυσης σε υφιστάμενο πλαίσιο). Το σημαντικό χαρακτηριστικό του δοκιμίου, όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή, είναι ότι αποτελείται από ένα σχετικά «ισχυρό» πλαίσιο (με ενίσχυση κυρίως των κόμβων) σε σχέση με ένα υφιστάμενο πλαίσιο με βάση τους κανονισμούς πριν το 1985, το οποίο εμφαννώνεται με ένα σχετικά «αδύναμο» τοίχωμα.

2.1.1 Διαστάσεις και οπλισμός

Η δοκός του πλαισίου έχει διαστάσεις 15x10 cm, ενώ τα υποστυλώματα 10x10 cm. Το πλαίσιο έχει ύψος 90 cm (75 cm μέχρι τον κεντροβαρικό άξονα της δοκού) και μήκος 150 cm (140 cm μεταξύ των κεντροβαρικών αξόνων των υποστυλωμάτων). Ο λόγος διάτμησης (ύψος/μήκος) του φαντώματος είναι $h_w/L_w = 75/130 = 0,58$. Επιλέγοντας αυτή την αναλογία, αναμένεται εν γένει ο φορέας να λειτουργήσει κυρίως διατμητικά.

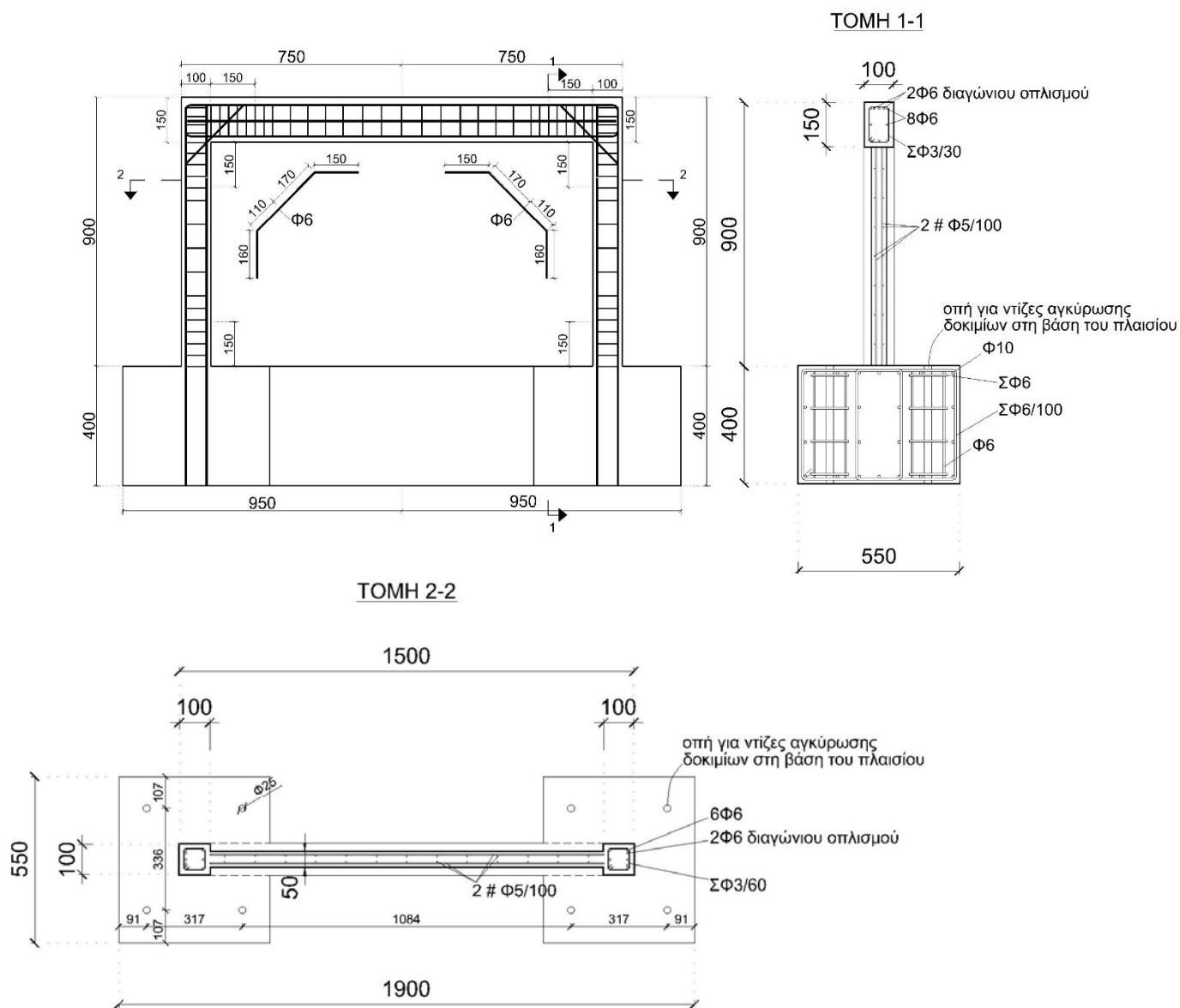
Για την επιλογή των τελικών παραμέτρων του οπλισμού του πλαισίου και του τοιχώματος συνεκτιμήθηκαν οι ακόλουθοι παράγοντες:

- Ικανοποίηση των σχέσεων ομοιότητας με βάση την κλίμακα 1:3
- Διατάξεις των κανονισμών ΕΚΩΣ και ΕΑΚ
- Η δοκός του πλαισίου να είναι ισχυρότερη από τα υποστυλώματα ώστε να αποκλειστεί η αστοχία του ζυγώματος

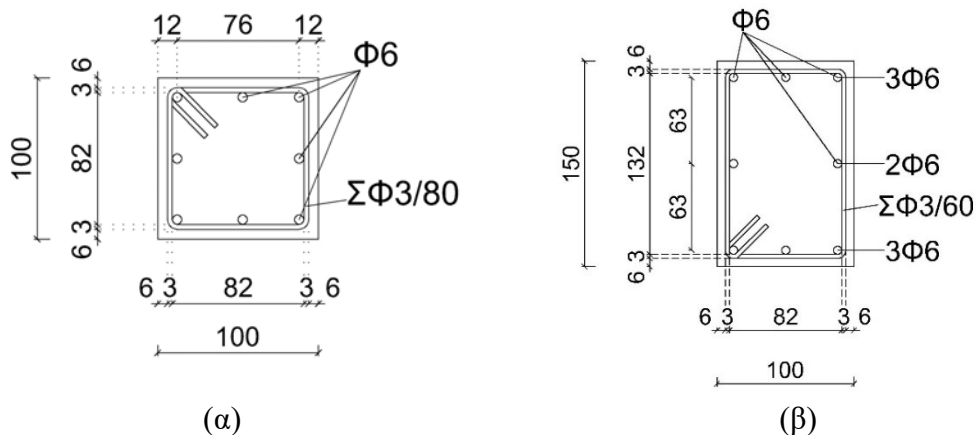
Τοποθετούνται διαμήκης και εγκάρσιος οπλισμός στη δοκό και στους στύλους, καθώς και 2 διαγώνιες ράβδοι σε κάθε άνω κόμβο για τοπική ενίσχυση (Σχ. 2.1). Το πλαίσιο του δοκιμίου κατασκευάστηκε λαμβάνοντας υπόψη τους σύγχρονους κανονισμούς. Πραγματοποιείται πύκνωση συνδετήρων στις κρίσιμες περιοχές δοκού και υποστυλωμάτων,

ελαττώνοντας στο ήμισυ τη απόστασή τους σε σχέση με αυτή με βάση τους κανονισμούς πριν το 1985.

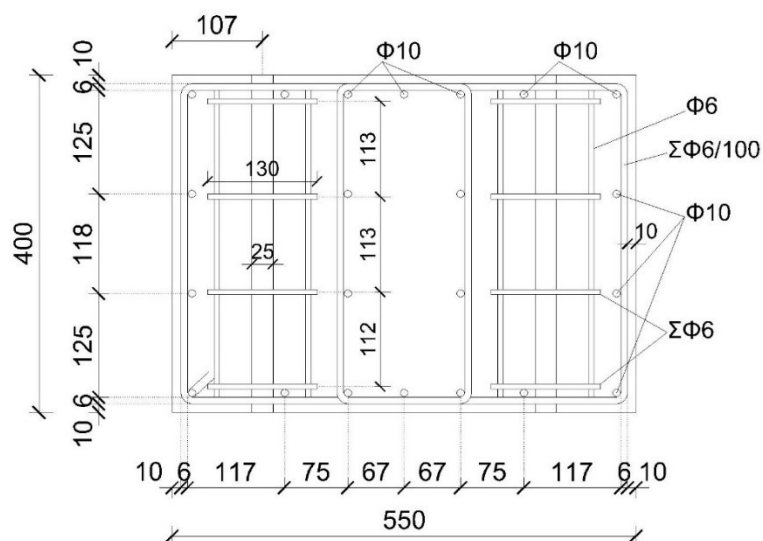
Το πλαίσιο αγκυρώνεται σε βάση Ο/Σ, η οποία είναι μια άκαμπτη και επαρκώς οπλισμένη δοκός (Σχ. 2.3) που σκυροδετείται ταυτόχρονα με το πλαίσιο. Οι διαμήκεις οπλισμοί των υποστυλωμάτων διαπερνούν τη βάση αγκύρωσης σε όλο το ύψος της.



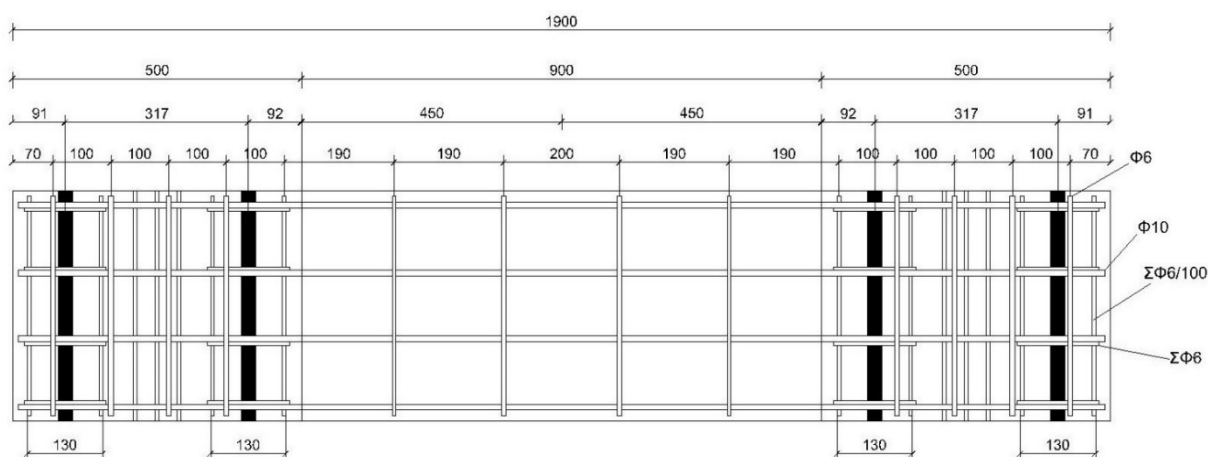
Σχήμα 2.1 – Λεπτομέρειες όπλισης πλαισίου και τοιχώματος δοκιμίου A8 (διαστάσεις σε mm).



Σχήμα 11.2 – Χαρακτηριστικά οπλισμού διατομών: (α) υποστυλωμάτων και (β) δοκού δοκιμίου Α8 (διαστάσεις σε mm).



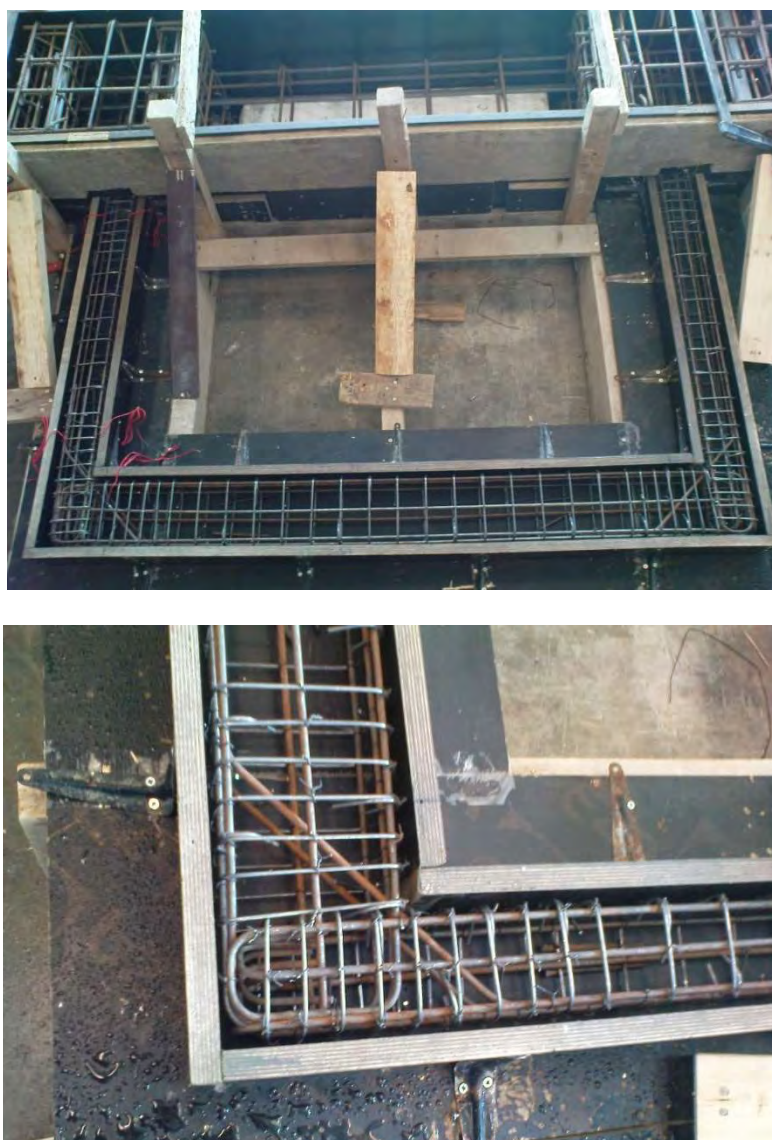
(α) πλευρική τομή



(β) εμπρόσθια τομή

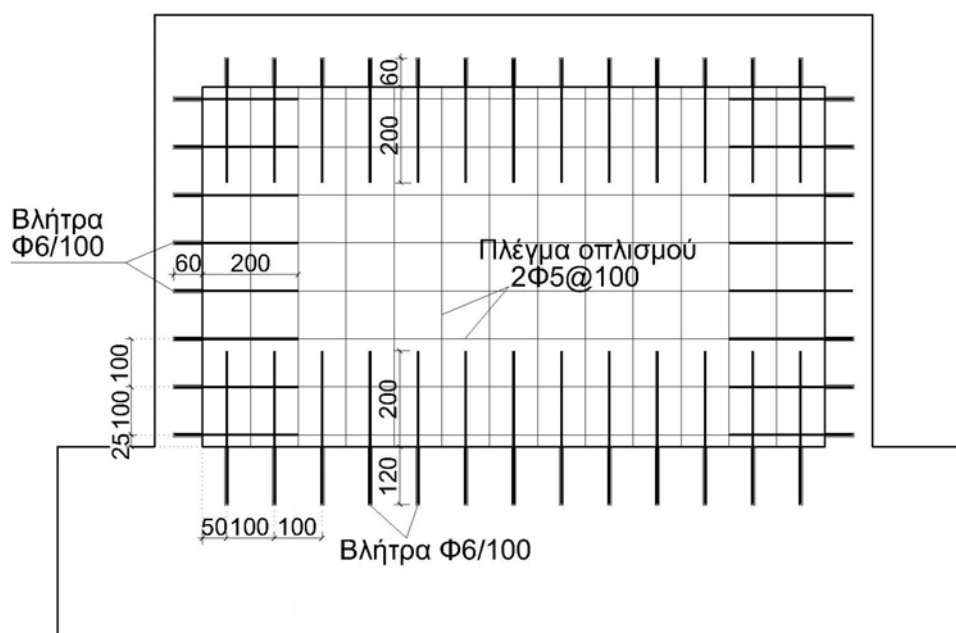
Σχήμα 2.3 – Λεπτομέρειες όπλισης βάσης θεμελίωσης του πλαισίου δοκιμίου Α8 (διαστάσεις σε mm).

Η βάση του δοκιμίου οπλίστηκε με ράβδους χάλυβα ποιότητας B500C και πακτώθηκε στο μεταλλικό πλαίσιο της πειραματικής διάταξης επιβολής του οριζόντιου φορτίου και μετακίνησης μέσω 8 ράβδων προέντασης Dywidag. Κατά τη σκυροδέτηση εγκιβωτίστηκαν εντός της βάσης αγκύρωσης πλαστικοί σωλήνες Φ25 στις προβλεπόμενες θέσεις για τις μεταλλικές ντίζες αγκύρωσης της βάσης στο γενικό πλαίσιο της πειραματικής διάταξης. Τοποθετήθηκαν επίσης πρόσθετοι συνδετήρες γύρω από τους πλαστικούς σωλήνες για την ανάληψη των δυνάμεων διάρρηξης στο σκυρόδεμα. Η σκυροδέτηση του πλαισίου και κατόπιν του τοιχώματος έγινε σε οριζόντια διάταξη (Σχ. 2.4, 2.6) στο δάπεδο του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Κατασκευών Ο/Σ.



Σχήμα 2.4 - Ξυλότυπος και οπλισμός δοκιμίου Α8.

Πριν την σκυροδέτηση του εμφανιζόμενου τοιχώματος έγινε εκτράχυνση περιμετρικά της παρειάς εσωτερικά του πλαισίου και της βάσης (Σχ. 2.6). Επίσης τοποθετήθηκαν διατμητικοί σύνδεσμοι (βλήτρα) στις διεπιφάνειες πλαισίου-τοιχώματος και πλαισίου-βάσης αγκύρωσης ανά 10 cm. Οι σύνδεσμοι αυτοί είναι ράβδοι χάλυβα Φ6 με νευρώσεις. Για την αγκύρωση τους με ρητίνη στα υποστυλώματα, την δοκό και τη βάση ανοίχθηκαν οπές διαμέτρου 8 mm. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.5, τα βλήτρα έχουν μήκος έμπηξης 120 mm ($20d_b$) για αγκύρωση στη βάση του δοκιμίου (κάτω), 60 mm ($10d_b$) στα υποστυλώματα και δοκό (πάνω) και μήκος αναμονής για το τοίχωμα 200 mm ($33d_b$). Το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης ράβδου διαμέτρου d_b με νευρώσεις για σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής $f_{cc}=21,7$ MPa ($f_{ctk,0.05}=1,60$ MPa) και καλές συνθήκες συνάφειας είναι $l_b=33d_b$. Στο τοίχωμα τοποθετήθηκε διπλό μεταλλικό πλέγμα οπλισμού Φ5 ανά 10 cm.



Σχήμα 2.5 – Χαρακτηριστικά βλήτρων και οπλισμού τοιχώματος δοκιμίου A8 (διαστάσεις σε mm).



Σχήμα 2.6 - Πλαίσιο δοκιμίου A8 μετά την έμπηξη των βλήτρων περιμετρικά και την τοποθέτηση διπλού μεταλλικού πλέγματος για το τοίχωμα.

2.1.2 Υλικά

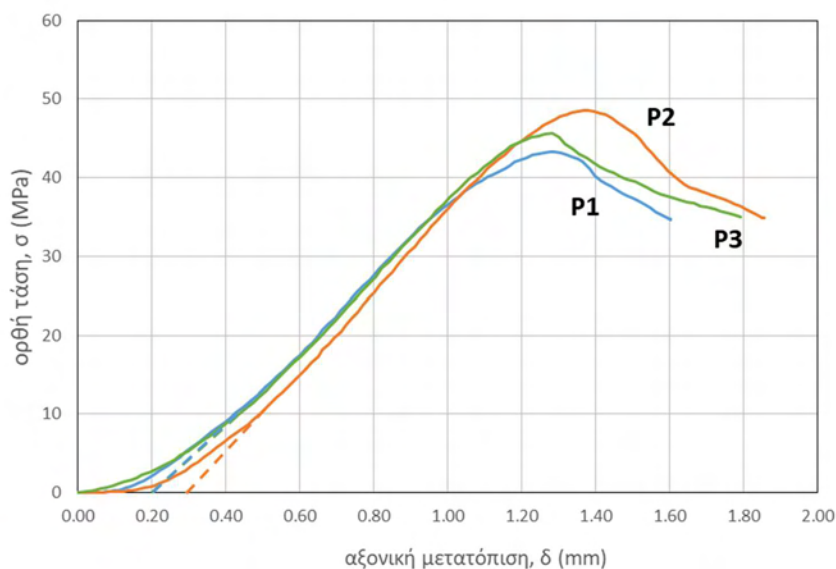
Η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος προσδιορίστηκε από δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε κύβους $15 \times 15 \times 15$ cm την ημέρα της δοκιμής και δίνεται στον Πίν. 2.1. Στον Πίν. 2.1, περιλαμβάνονται επίσης οι τιμές της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος κυλίνδρου για την ημέρα της δοκιμής, που εκτιμήθηκαν με βάση τη θλιπτική αντοχή κύβου. Επισημαίνεται ότι

για την κοκκομετρία των αδρανών του μίγματος σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε τηρήθηκε η σχέση ομοιότητας με βάση την κλίμακα 1:3.

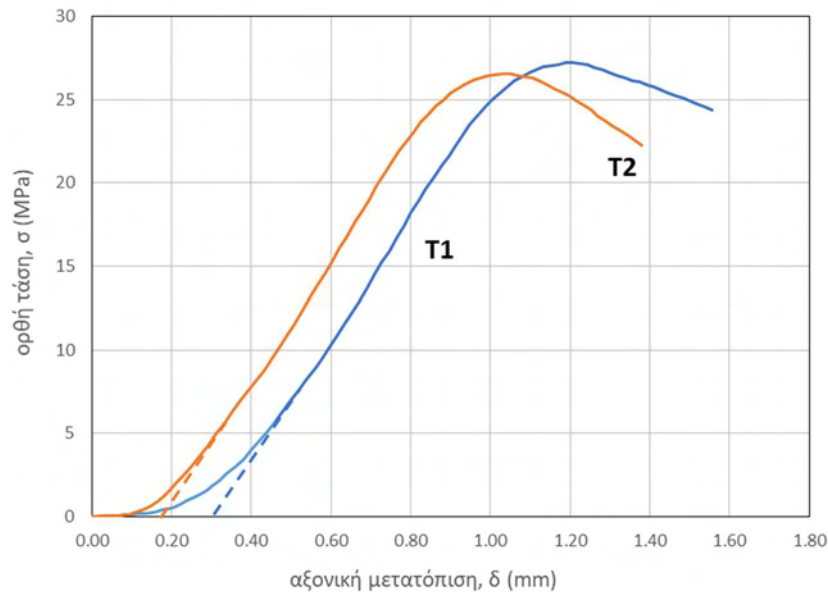
Πίνακας 2.1 – Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος πλαισίου και τοιχώματος δοκιμίου Α8.

ημερομηνία σκυροδέτησης πλαισίου	θλιπτική αντοχή σκυροδέματος πλαισίου, f_c κύβου (κυλίνδρου) - ημέρα δοκιμής (MPa)	ημερομηνία σκυροδέτησης τοιχώματος	θλιπτική αντοχή σκυροδέματος τοιχώματος, f_c κύβου (κυλίνδρου) - ημέρα δοκιμής (MPa)	ημερομηνία δοκιμής
10/4/2014	45,6 (35,6)	11/6/2014	26,7 (21,7)	23/2/2018

Για τη βάση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε έτοιμο σκυρόδεμα (γαρμπιλομετό) ονομαστικής αντοχής C25/30. Στα Σχ. 2.7, 2.8 φαίνονται τα διαγράμματα τάσης-αξονικής μετακίνησης, σ - δ , μονοαξονικής θλίψης κυβικών δοκιμών για το σκυρόδεμα πλαισίου και τοιχώματος την ημέρα της δοκιμής.



Σχήμα 2.7 – Διαγράμματα σ - δ μονοαξονικής θλίψης κυβικών δοκιμών για σκυρόδεμα πλαισίου δοκιμίου Α8.



Σχήμα 2.8 - Διαγράμματα σ - δ μονοαξονικής θλίψης κυβικών δοκιμίων για σκυρόδεμα τοιχώματος δοκιμίου A8.

Τα χαρακτηριστικά των ράβδων οπλισμού για το δοκίμιο A8 παρουσιάζονται στον Πίν. 2.2. Η τάση διαρροής των ράβδων επελέγη ώστε να τηρούνται οι σχέσεις ομοιότητας για την αναλογία φυσικής κλίμακας 1:3. Για τους συνδετήρες των υποστυλωμάτων και της δοκού του πλαισίου χρησιμοποιήθηκε χαλύβδινο σύρμα με μέση τάση διαρροής $f_{sy} \approx 560$ MPa και διάμετρο $\Phi 3$, ώστε να είναι συμβατή με την κλίμακα 1:3 και να αντιστοιχεί σε συνδετήρα $\Phi 8$ στην πρωτότυπη κατασκευή. Για τον διαμήκη οπλισμό και τις διαγώνιες ράβδους επιλέχθηκαν λείες ράβδοι χάλυβα $\Phi 6$ με μέση τάση διαρροής 350 MPa, ώστε να ικανοποιούνται όσον το δυνατόν καλύτερα οι σχέσεις ομοιότητας για την κλίμακα 1:3 σε σχέση με λείες ράβδους $\Phi 18$ ή $\Phi 20$ του διαμήκη οπλισμού στο πρωτότυπο. Για τα βλήτρα επιλέχθηκαν ράβδοι χάλυβα $\Phi 6$ με νευρώσεις από κουλούρα. Ο χάλυβας αυτός ευθυγραμμίστηκε και υποβλήθηκε σε διαδικασία ανόπτησης (650°C για 2 ώρες) ώστε να μειωθεί η τάση διαρροής του από 665 σε 470 MPa και να αυξηθεί η ολκιμότητά του στα επιθυμητά επίπεδα με βάση τις σχέσεις ομοιότητας.

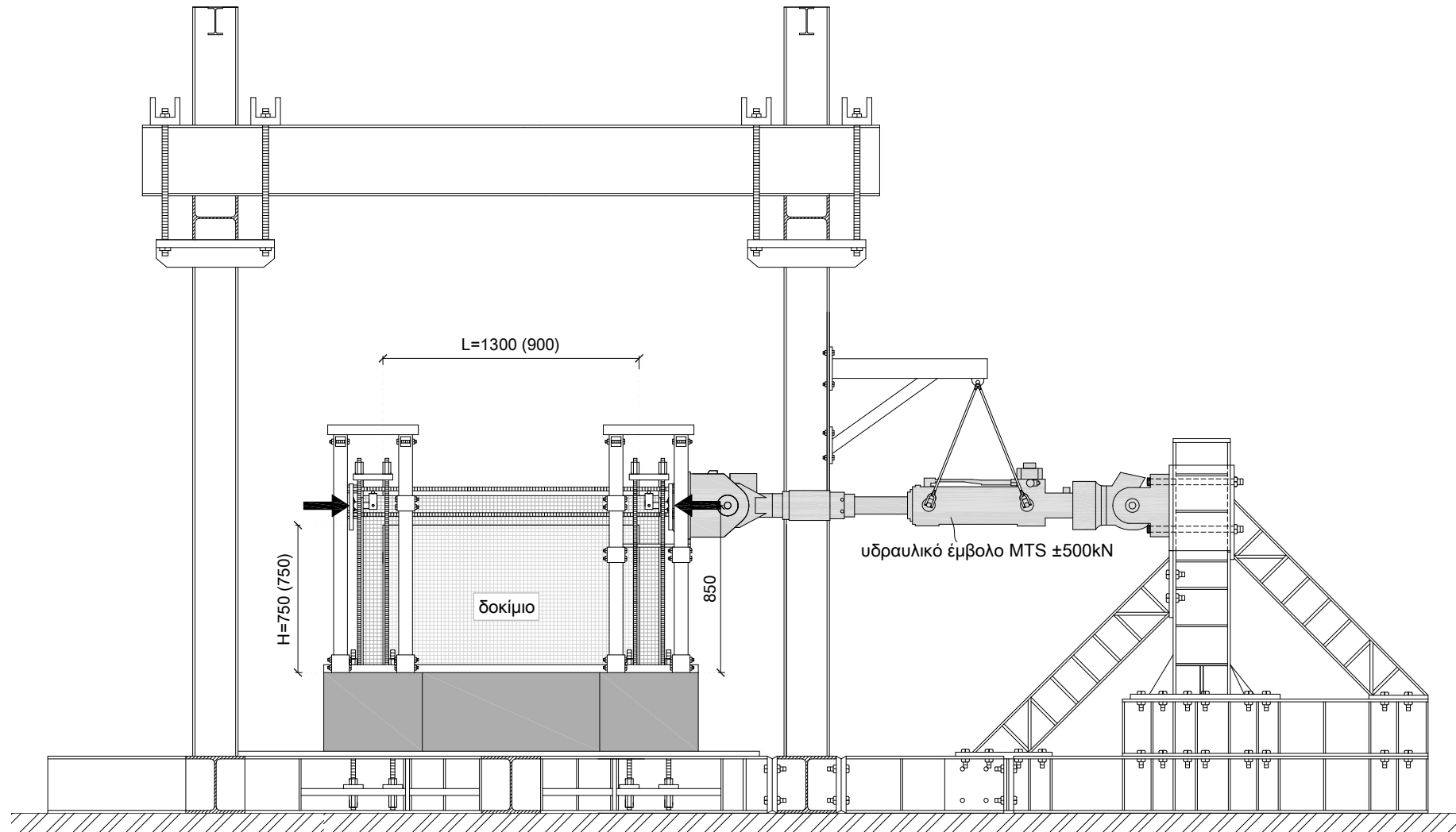
Πίνακας 2.2 – Χαρακτηριστικά χαλύβδινων ράβδων οπλισμού δοκιμίου Α8.

Οπλισμός	ονομαστική διάμετρος	είδος χάλυβα	περιγραφή	f_{sy} (MPa)	ϵ_{sy} (‰)
Διαμήκης					
δοκός πλαισίου	Φ6	λείος	8Φ6	350	1.75
υποστυλώματα πλαισίου	Φ6	λείος	6Φ6	350	1.75
Διαγώνιες ράβδοι στους κόμβους	Φ6	λείος	2Φ6	350	1.75
Συνδετήρες					
δοκός	Φ3	σύρμα	Σ Φ3/60	560	-
υποστυλώματα πλαισίου	Φ3	σύρμα	Σ Φ3/60	560	-
Πλέγμα τοιχώματος	Φ5	με νευρώσεις	2 Φ5/100	500	-
Βλήτρα					
σε όλες τις διεπιφάνειες	Φ6	με νευρώσεις	Φ6/100	470	2.35

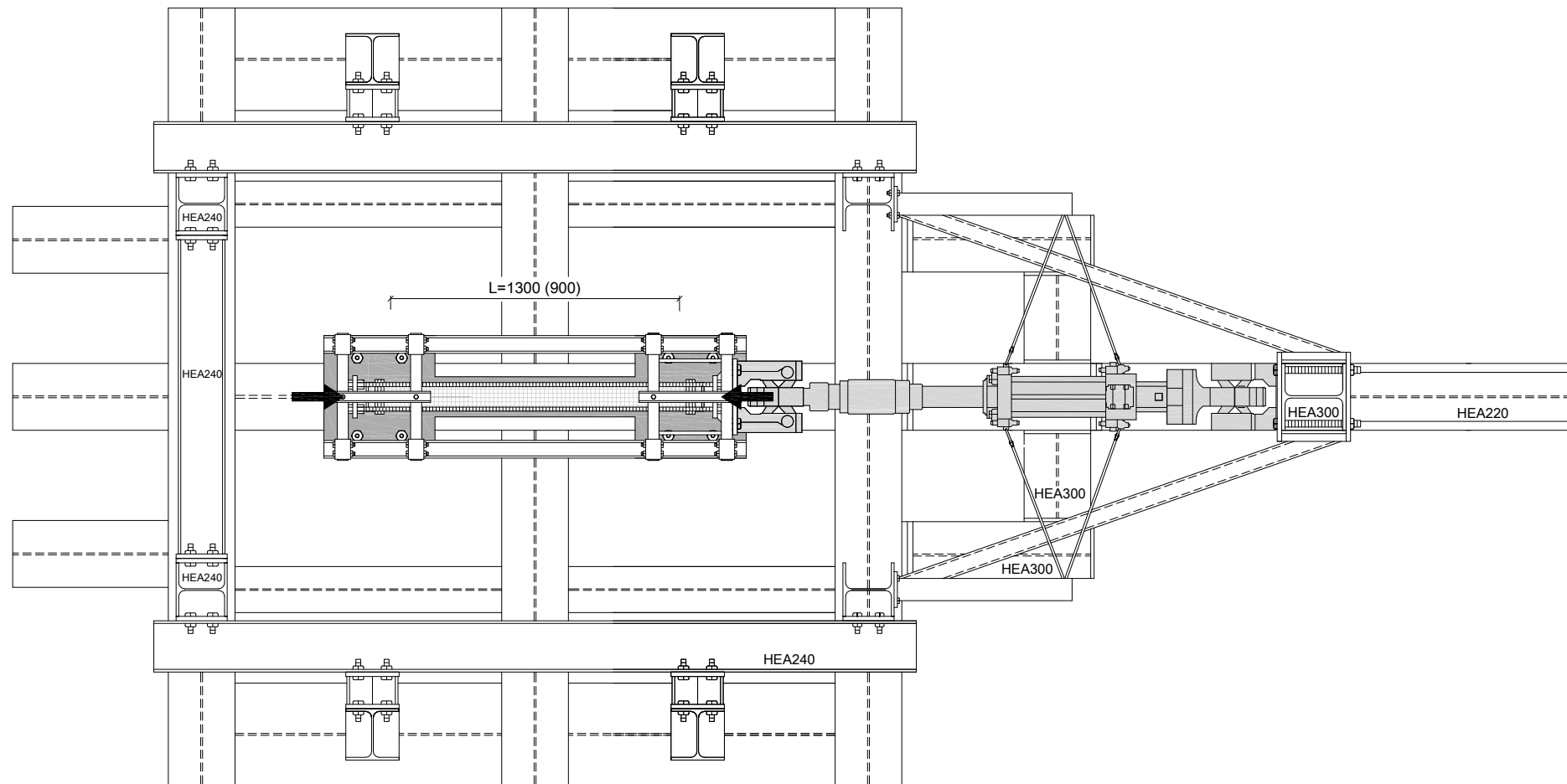
2.2 Πειραματική Διάταξη

Η μορφή της πειραματικής διάταξης παρουσιάζεται στα Σχ. 2.9 και 2.10, όπου απεικονίζεται το μεταλλικό πλαίσιο του Εργαστηρίου «Τεχνολογίας και Κατασκευών Ο.Σ.», μέσω του οποίου επιβλήθηκε η προβλεπόμενη φόρτιση στο δοκίμιο Α8. Η οριζόντια φόρτιση επιβλήθηκε στον άξονα της δοκού του πλαισίου μέσω υδραυλικού εμβόλου MTS ± 500 kN ελεγχόμενου από ψηφιακό σερβοϋδραυλικό σύστημα FlexTest 40. Η φόρτιση του δοκιμίου έγινε μέσω ειδικής διάταξης μεταλλικής πλάκας/πείρου, ώστε αφενός μεν να εξασφαλίζεται η πλήρης και συνεχής επαφή του εμβόλου με το δοκίμιο, αφετέρου δε να επιτρέπεται τυχόν στροφή του δοκιμίου γύρω από τον άξονα, κάθετο στο επίπεδό του κατά την επιβολή της οριζόντιας φόρτισης.

Εκτός των μεταλλικών στοιχείων που απαιτήθηκαν για την αγκύρωση του δοκιμίου, για την αποφυγή ολίσθησης της βάσης του και την ασφαλή εφαρμογή των ανακυκλιζόμενων οριζόντιων μετακινήσεων, τοποθετήθηκαν βοηθητικά μεταλλικά πλαίσια που πακτώθηκαν στη βάση του δοκιμίου. Στο ένα πλαίσιο στηρίχτηκαν μετρητικά όργανα και στο άλλο ένα ειδικό σύστημα κύλισης το οποίο εμπόδιζε μετακινήσεις του δοκιμίου εκτός του επιπέδου του και επέτρεπε την ελεύθερη μετακίνησή του στο επίπεδό του (βλ. Σχ. 2.11).



(α) καθ' ύψος τομή (διαστάσεις σε mm).



(β) κάτοψη (διαστάσεις σε mm).

Σχήμα 2.9 - Πειραματική διάταξη για ανακυκλιζόμενη οριζόντια φόρτιση του δοκιμίου A8.



Σχήμα 2.10 - Πειραματική διάταξη για ανακυκλιζόμενη οριζόντια φόρτιση δοκιμίου A8: υδραυλικό έμβολο αριστερά, 4 ράβδοι Dywidag στο ύψος της δοκού για την επιβολή του θετικού φορτίου και ανεξάρτητα βοηθητικά μεταλλικά πλαίσια στήριξης.



Σχήμα 2.11 - Πλευρική στήριξη δοκιμίου A8 μέσω ανεξάρτητου μεταλλικού πλαισίου.



Σχήμα 2.12 - Υδραυλικό έμβολο επιβολής φόρτισης.

Ως εμπρόσθια όψη του δοκιμίου ορίζεται η όψη στην οποία το υδραυλικό έμβολο βρίσκεται αριστερά του δοκιμίου. Η φορά του επιβαλλόμενου φορτίου (P_h) ή της μετακίνησης (δ_h) προς τα αριστερά καθώς και η φορά στην εμπρόσθια όψη του δοκιμίου έχει οριστεί ως «θετική» (επιβολή φορτίου στον δεξιό κόμβο δοκού/υποστυλώματος), και αντίστοιχα η φορά προς τα δεξιά ως προς την εμπρόσθια όψη έχει οριστεί ως «αρνητική» (επιβολή φορτίου στον αριστερό κόμβο δοκού/υποστυλώματος). Το «αριστερό άκρο του πλαισίου» είναι το άκρο που βρίσκεται σε επαφή με το υδραυλικό έμβολο.

2.3 Ιστορία Φόρτισης

Το δοκίμιο A8 υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, με δύο (2) πλήρεις κύκλους ανά βήμα φόρτισης. Αρχικά επιβλήθηκε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ($n=2$ κύκλοι) για 3 τιμές επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου, P_h , ± 20 , ± 40 και ± 60 kN και στην συνέχεια εφαρμόστηκε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ($n=2$ κύκλοι) με βαθμιαία αυξανόμενη επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση, δ_h . Ως βάση μετακίνησης για την ανακυκλιζόμενη φόρτιση επελέγη η τιμή $\delta_{h1}=0,15$ mm και η επιβαλλόμενη μετακίνηση ήταν πολλαπλάσια της δ_{h1} ($\delta_h=2\delta_{h1}$ έως και $\delta_h=120\delta_{h1}$).

2.4 Μετρητικά Όργανα – Μετρήσεις

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μετακινήσεων μέσω μηχανοκίνητων (DCDT's και wire gages) και ανηγμένων παραμορφώσεων μέσω ηλεκτρομηκυνσιομέτρων (strain gages) στις ράβδους οπλισμού και στην επιφάνεια του σκυροδέματος του τοιχώματος.

2.4.1 Μετακινήσεις

Αναλυτικά έγιναν οι εξής μετρήσεις (Σχ. 2.13 και 2.14):

- Οριζόντια σχετική μετακίνηση της δοκού του δοκιμίου σε σχέση με τη βάση του (δ_h)
- Μεταβολή μήκους των διαγωνίων του πλαισίου R, S (ΔR , ΔS)
- Μεταβολή μήκους των διαγωνίων του τοιχώματος G, L (ΔG , ΔL)
- Αποκόλληση αριστερού και δεξιού υποστυλώματος από το τοίχωμα σε ύψος $H/2$ από τη βάση (H =ύψος υποστυλώματος)
- Σχετική ολίσθηση αριστερού υποστυλώματος - τοιχώματος σε ύψος $H/2$ από τη βάση
- Αποκόλληση τοιχώματος από τη δοκό στις θέσεις $\ell_w/4$ και $3\ell_w/4$ (ℓ_w =μήκος τοιχώματος)
- Σχετική ολίσθηση τοιχώματος-δοκού στη θέση $\ell_w/4$
- Αποκόλληση τοιχώματος από τη βάση στις θέσεις $\ell_w/4$ και $3\ell_w/4$
- Σχετική ολίσθηση τοιχώματος-βάσης στις θέσεις $\ell_w/4$ και $3\ell_w/4$



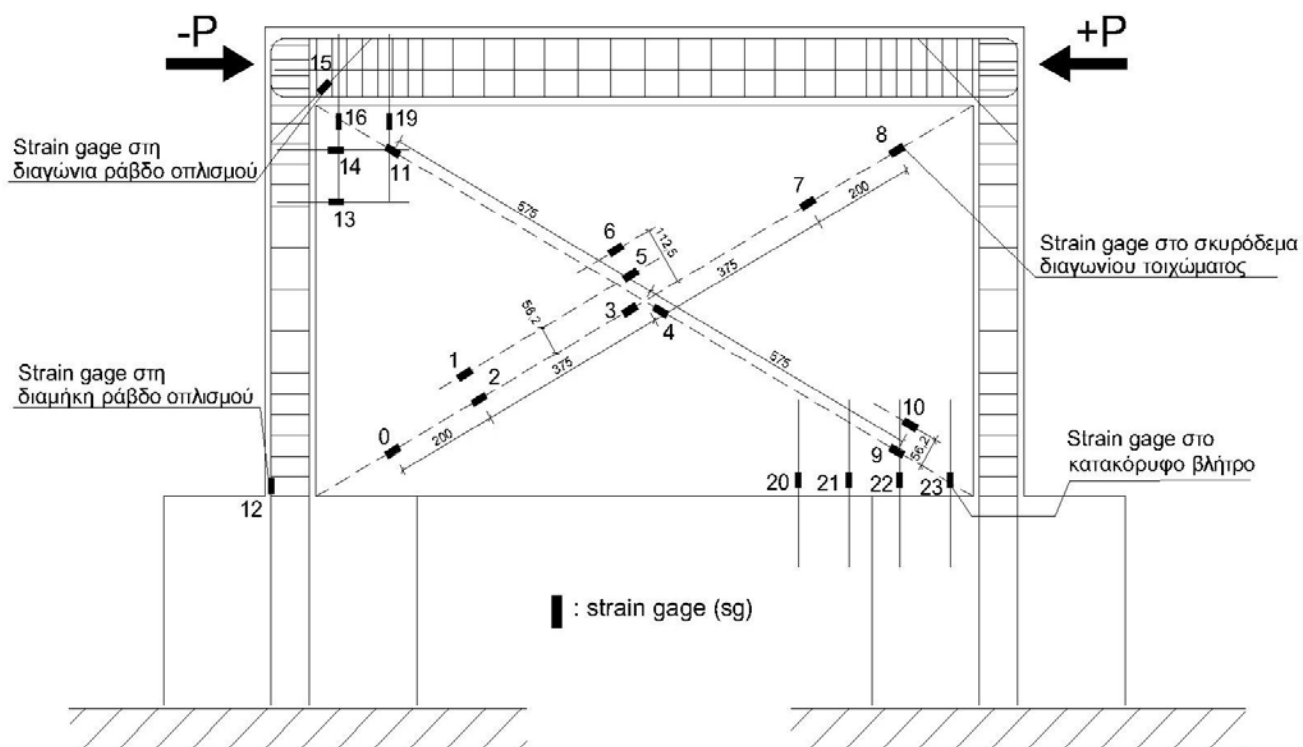
30

2.4.2 Ανηγγμένες παραμορφώσεις

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανηγμένων παραμορφώσεων σκυροδέματος του τοιχώματος σε δώδεκα (12) επιλεγμένα σημεία κατά μήκος των 2 διαγωνίων του στην επιφάνεια του σκυροδέματος με ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (strain gages, “sg”) (Σχ. 2.14). Εκτός από την διεύθυνση κάθε διαγωνίου, τοποθετήθηκαν sg’s και παράλληλα αυτής σε αποστάσεις $0.15L/2 = 113 \text{ mm}$ και $0.15L/4 = 56 \text{ mm}$ (όχι μεγαλύτερες του προτεινόμενου στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. πλάτους θλιπτήρα $0.15L = 225 \text{ mm}$).

Επίσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα σε οκτώ (8) διατμητικούς συνδέσμους στο σημείο της ράβδου που απέχει περίπου 1 cm από την διεπιφάνεια. Τα sg’s τοποθετήθηκαν στους τέσσερις (4) πρώτους κατακόρυφους διατμητικούς συνδέσμους της δεξιάς πλευράς της κάτω διεπιφάνειας τοιχώματος-βάσης αγκύρωσης (sg’s 20, 21, 22, 23), στους δύο πρώτους κατακόρυφους διατμητικούς συνδέσμους της αριστερής πλευράς της πάνω διεπιφάνειας τοιχώματος-δοκού πλαισίου (sg’s 16, 19) και στους δύο πρώτους οριζόντιους διατμητικούς συνδέσμους του πάνω τμήματος της διεπιφάνειας τοιχώματος-αριστερού υποστυλώματος (sg’s 13, 14) (Σχ. 2.14)

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα με sg’s σε δύο ράβδους οπλισμού στο πλαίσιο του δοκιμίου. Ένα τοποθετήθηκε σε διαμήκη ράβδο στην αριστερή παρειά του αριστερού υποστυλώματος στο ύψος της βάσης του (sg-12) και ένα στη διαγώνια ράβδο οπλισμού του πάνω αριστερού κόμβου του πλαισίου (sg-15) (Σχ. 2.14).

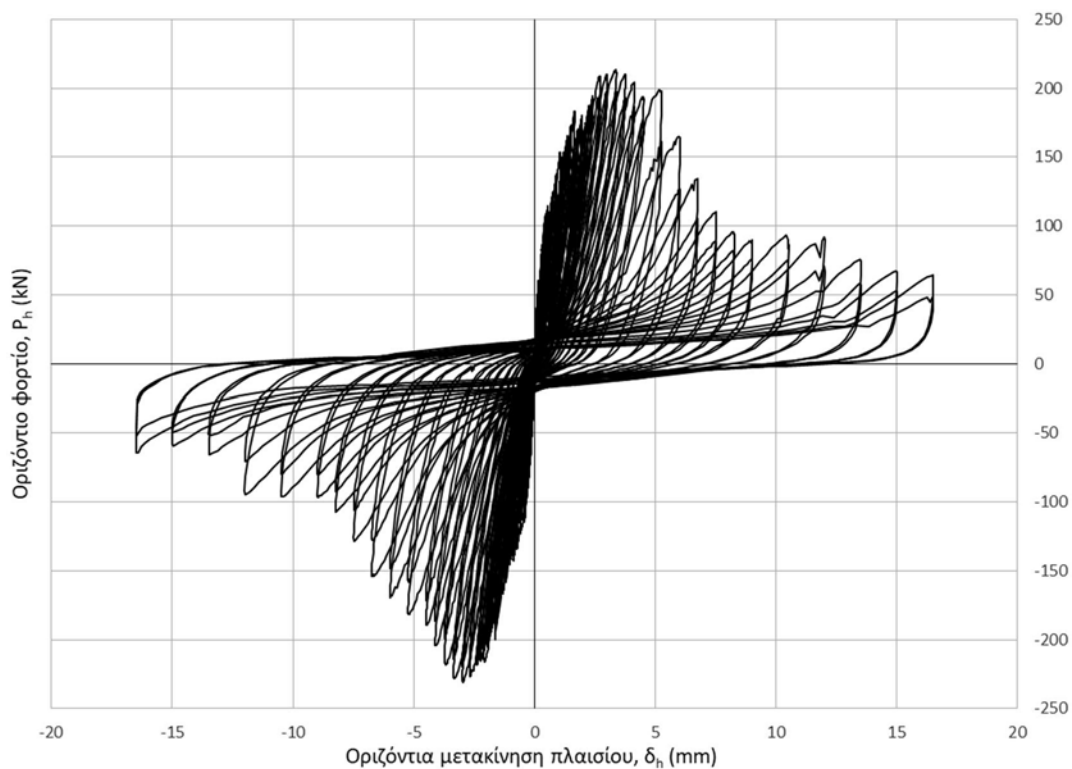


Σχήμα 2.14 - Θέσεις ηλεκτρομηκυνσιομέτρων (sg's) στο δοκίμιο A8 (εμπρόσθια όψη - μήκη αποστάσεων σε mm).

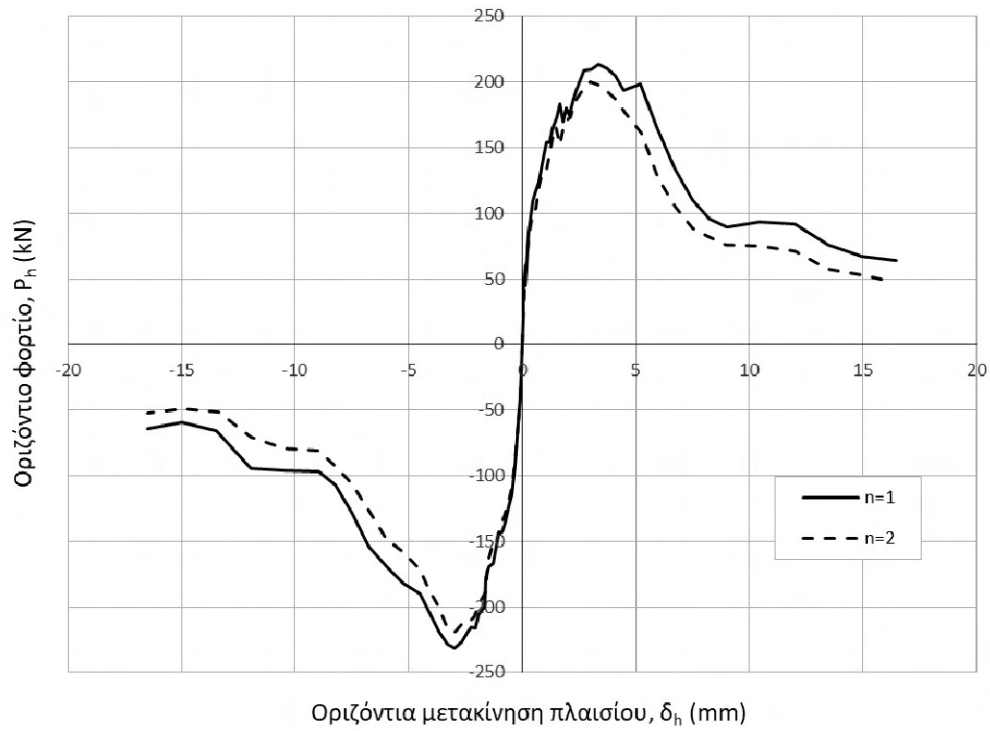
Κεφάλαιο 3ο: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Διαγράμματα Φορτίου-Μετακίνησης

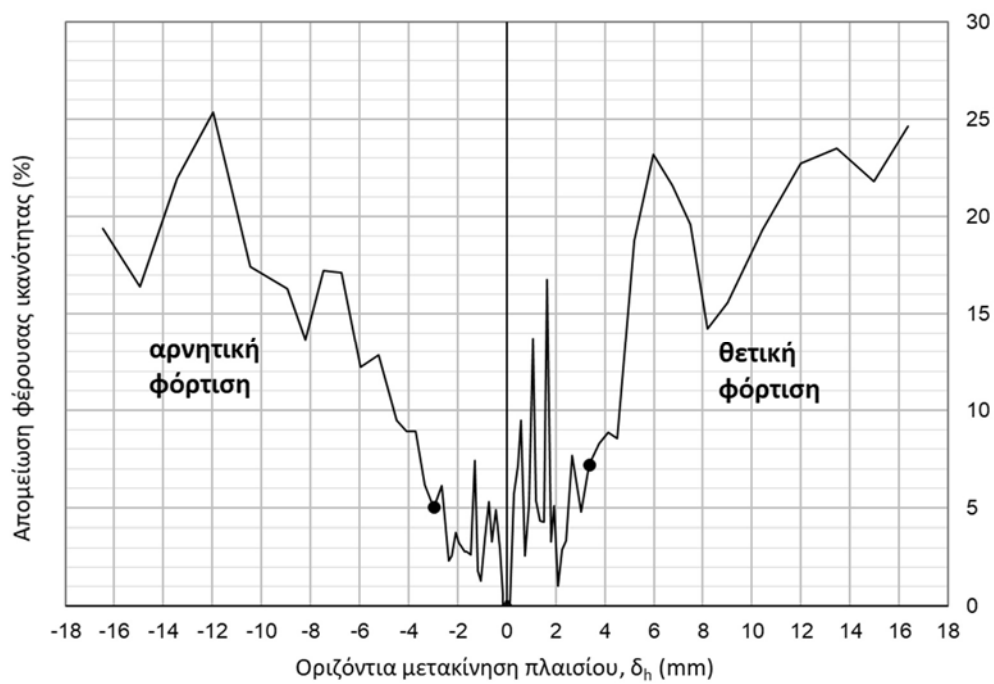
Το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης ($P_h - \delta_h$) του δοκιμίου A8 παρουσιάζεται στο Σχ. 3.1. Υπενθυμίζεται ότι ως θετική έχει οριστεί η φορά του επιβαλλόμενου φορτίου ή μετακίνησης στο πλαίσιο προς τα αριστερά ως προς την εμπρόσθια όψη του (υδραυλικό έμβολο αριστερά του δοκιμίου και επιβολή του φορτίου ή μετακίνησης στον δεξιό κόμβο του πλαισίου με τη δοκό). Η περιβάλλουσα για τον 1^ο και 2^ο κύκλο φόρτισης ($n=1, 2$) παρουσιάζεται στο Σχ. 3.2. Επίσης, στο Σχ. 3.3 παρουσιάζεται ο ρυθμός απομείωσης της φέρουσας ικανότητας σε κάθε επιβαλλόμενη μετακίνηση, δ_h , λόγω του 2^{ου} κύκλου φόρτισης.



Σχήμα 3.1 – Διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης δοκιμίου A8.



Σχήμα 3.2 – Περιβάλλουσα διαγράμματος φορτίου-μετακίνησης δοκιμίου Α8.



Σχήμα 3.3 – Απομείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω του 2^{ου} κύκλου φόρτισης σε κάθε βήμα επιβαλλόμενης μετακίνησης δ_h (δοκίμιο Α8).

Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα, $P_{h,max} = 231 \text{ kN}$, επετεύχθη κατά την αρνητική φορά φόρτισης για επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση ίση με -2.96 mm . Το μέγιστο φορτίο κατά τη θετική φορά φόρτισης, 213 kN , παρατηρήθηκε αμέσως μετά σε επιβαλλόμενη μετακίνηση $+3.35 \text{ mm}$.

3.2. Ρηγμάτωση – Είδος Αστοχίας

Γενικά χαρακτηριστικά ρηγμάτωσης του δοκιμίου A8:

Παρατηρήθηκαν:

- α) Οριζόντιες ρωγμές καθ' ύψος των υποστυλωμάτων λόγω εφελκυσμού που αναπτύσσεται στα αντίστοιχα υποστυλώματα κατά την διαδικασία φόρτισης (συνδυασμός αξονικής δύναμης και κάμψης).
- β) Λοξή ρηγμάτωση στους πάνω κόμβους του πλαισίου
- γ) Ρωγμές αποκόλλησης στις διεπιφάνειες του τοιχώματος με το πλαίσιο. Εκτεταμένη ρηγμάτωση στη διεπιφάνεια με τη βάση αγκύρωσης, λιγότερο εκτεταμένη ρηγμάτωση στις διεπιφάνειες με τα υποστυλώματα και περιορισμένη ρηγμάτωση στη διεπιφάνεια με τη δοκό.
- δ) Εκτεταμένη ρηγμάτωση με σχετικά μικρά ανοίγματα ρωγμών στο τοίχωμα και σύνθλιψη του σκυροδέματος στις κάτω γωνίες.

Αναλυτική πορεία ρηγμάτωσης:

Παρατηρείται τριχοειδής οριζόντια ρηγμάτωση κατά μήκος της κάτω διεπιφάνειας του τοιχώματος σε επιβαλλόμενη μετακίνηση περίπου 0.3 mm ($P_h \approx 0.38P_{h,max}$).

Σε επιβαλλόμενη μετακίνηση 0.60 mm ($P_h \approx 0.50P_{h,max}$) παρατηρούνται οι πρώτες τριχοειδείς οριζόντιες ρωγμές στις βάσεις των δύο υποστυλωμάτων λόγω της εφελκυστικής δύναμης (αξονική δύναμη + κάμψη) που αναπτύσσεται στα υποστυλώματα κατά την διαδικασία φόρτισης. Επίσης στον ίδιο κύκλο παρατηρούνται οι πρώτες ρηγματώσεις στο κάτω ήμισυ του τοιχώματος.

Στα υποστυλώματα σταδιακά με την αύξηση της επιβαλλόμενης φόρτισης αυξάνει περαιτέρω το άνοιγμα και το μήκος των αρχικών ρωγμών και εμφανίζονται νέες. Σε επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση 1.05 mm ($P_h \approx 0.65P_{h,max}$) παρατηρείται η πρώτη λοξή

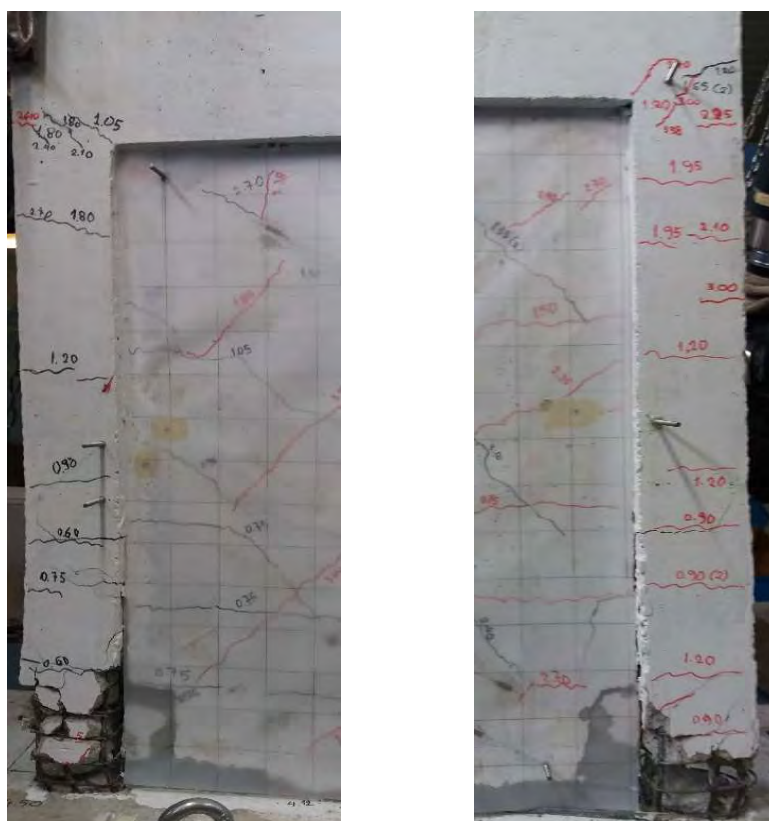
ρηγματώση στον αριστερό κόμβο του πλαισίου (σε επαφή με το έμβολο φόρτισης), στην αρνητική κατεύθυνση φόρτισης, για την οποία ο κόμβος υπόκειται σε θετικές ροπές κάμψης (εφελκυσμός στις ακραίες εσωτερικές ίνες του στην κατακόρυφη και οριζόντια διεπιφάνεια με το τοίχωμα) και θλίβει την διαγώνιο του τοιχώματος που ευρίσκεται σε επαφή. Στο επόμενο βήμα φόρτισης (1.20 mm) συμβαίνει το ίδιο στον δεξιό κόμβο (θετική φόρτιση).

Σταδιακά, με την αύξηση της επιβαλλόμενης φόρτισης επεκτείνονται οι ρηγματώσεις στο τοίχωμα και διευρύνονται οι ρωγμές στη κάτω διεπιφάνεια με τη βάση και στις διεπιφάνειες με τα υποστυλώματα. Μετά το βήμα οριζόντιας μετακίνησης που επιτυγχάνεται το μέγιστο φορτίο δεν παρατηρούνται επιπλέον ρηγματώσεις στο μέσο και πάνω μέρος του τοιχώματος και το τοίχωμα αποκολλάται από το πλαίσιο με ταχύτερο ρυθμό στις διεπιφάνειες με τη βάση και τα υποστυλώματα.

Τρόπος αστοχίας του δοκιμίου A8:

Παρατηρήθηκε καμπτοδιατμητική αστοχία στη βάση των υποστυλωμάτων σε συνδυασμό με σύνθλιψη των αντίστοιχων κάτω γωνιών του τοιχώματος που βρίσκονται σε επαφή με το πλαίσιο. Διαπιστώθηκε, επίσης, εκτεταμένη αποκόλληση και σχετική ολίσθηση στην κάτω διεπιφάνεια του τοιχώματος με τη βάση στην κάτω διεπιφάνεια (τελική θραύση κάποιων βλήτρων μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης), ενώ στην πάνω διεπιφάνεια τοιχώματος-δοκού μετρήθηκε αποκόλληση ίση περίπου με το 1/8 της αποκόλλησης στην διεπιφάνεια με τη βάση.

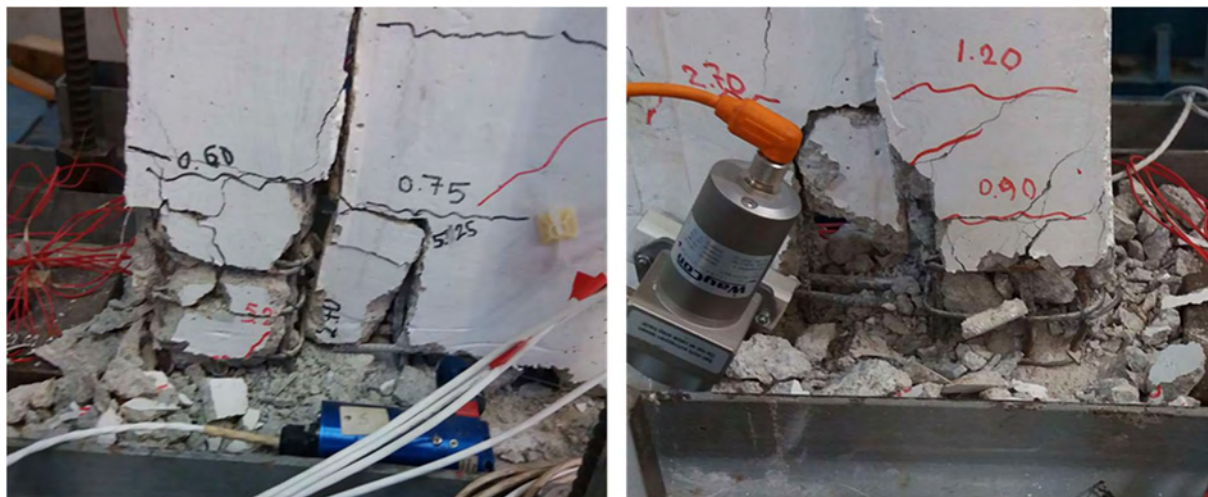
Οι ρηγματώσεις και το είδος αστοχίας για το δοκίμιο A8, απεικονίζονται στα Σχ. 3.4-3.9.



Σχήμα 3.4 – Τελική εικόνα ρηγματώσεων στα υποστυλώματα δοκιμίου A8.



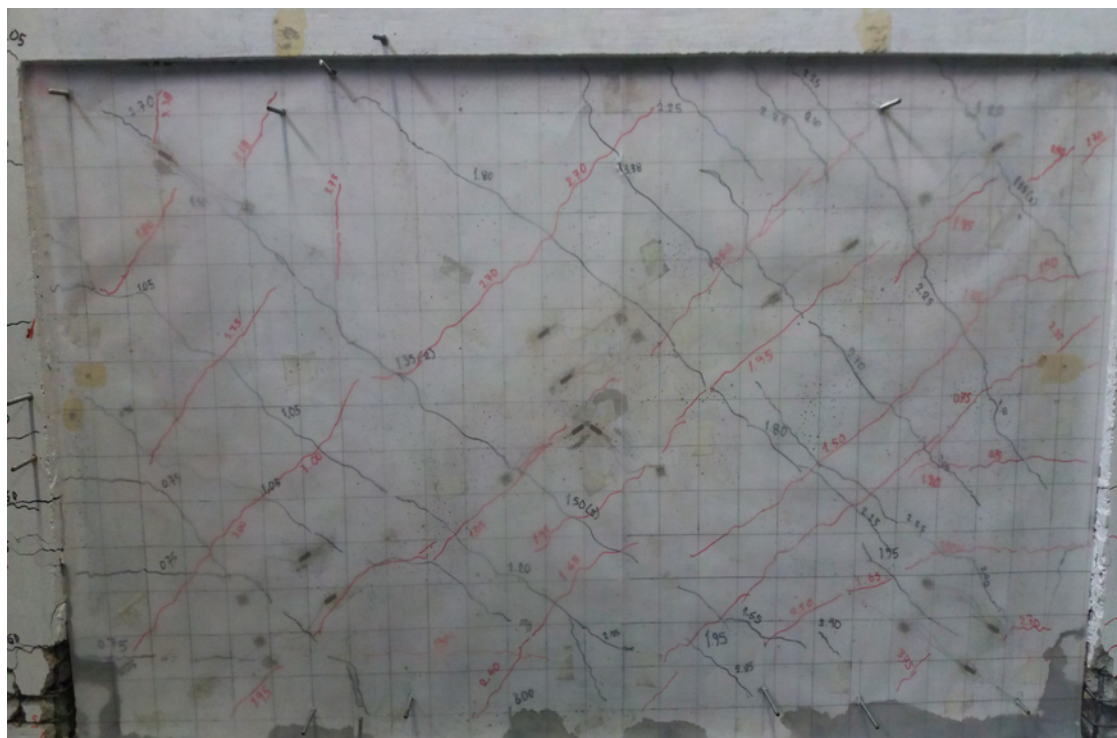
Σχήμα 3.5 – Ρηγμάτωση στη βάση του αριστερού υποστυλώματος (πίσω όψη) δοκιμίου A8.



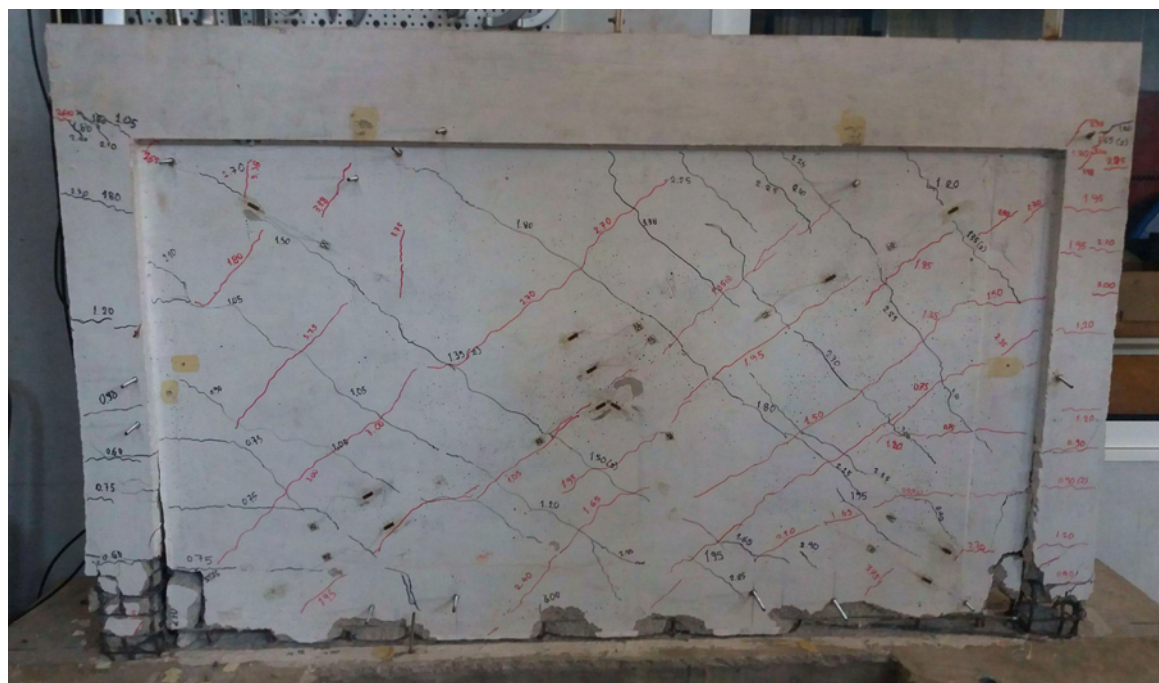
Σχήμα 3.6 – Τελική εικόνα αστοχίας στη βάση των υποστυλωμάτων και τοιχώματος (γωνίες) δοκιμίου A8.



Σχήμα 3.7 – Τελική εικόνα αστοχίας κάτω διεπιφάνειας τοιχώματος-βάσης δοκιμίου A8.



Σχήμα 3.8 – Τελική εικόνα ρηγμάτωσης στο τοίχωμα δοκιμίου Α8.



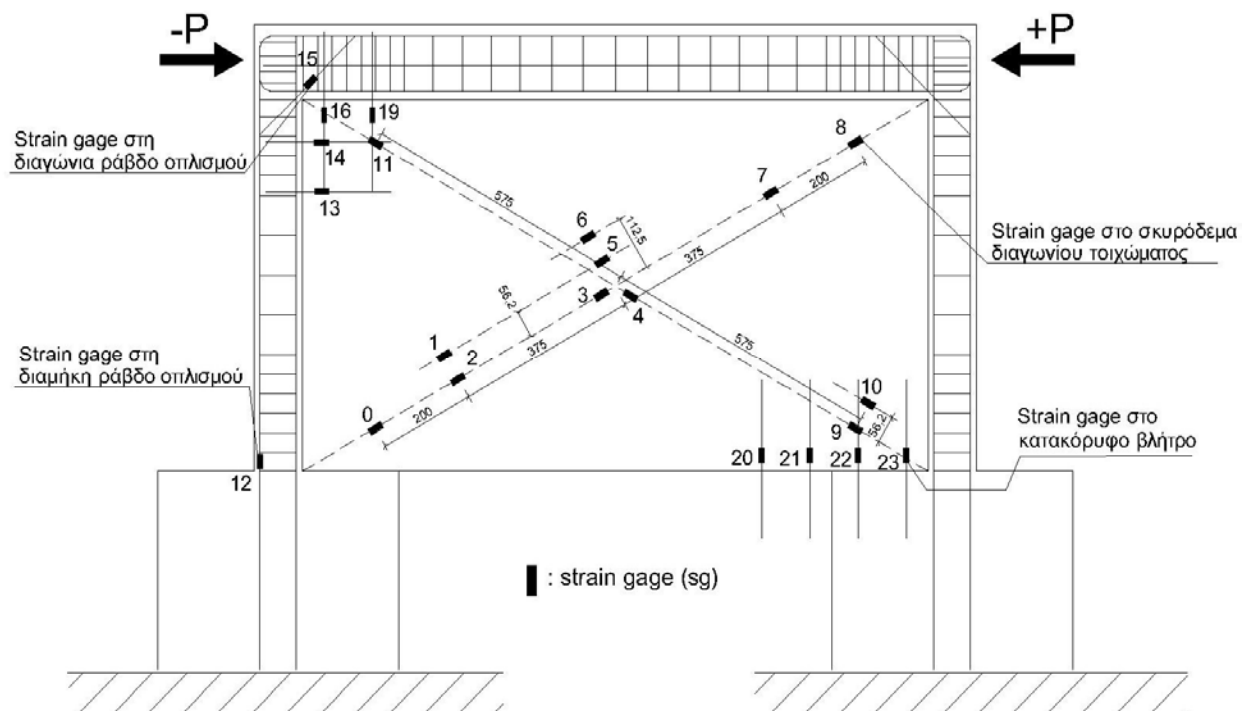
Σχήμα 3.9 – Τελική εικόνα αστοχίας δοκιμίου Α8.

3.3. Ανηγμένες Παραμορφώσεις Οπλισμού και Σκυροδέματος

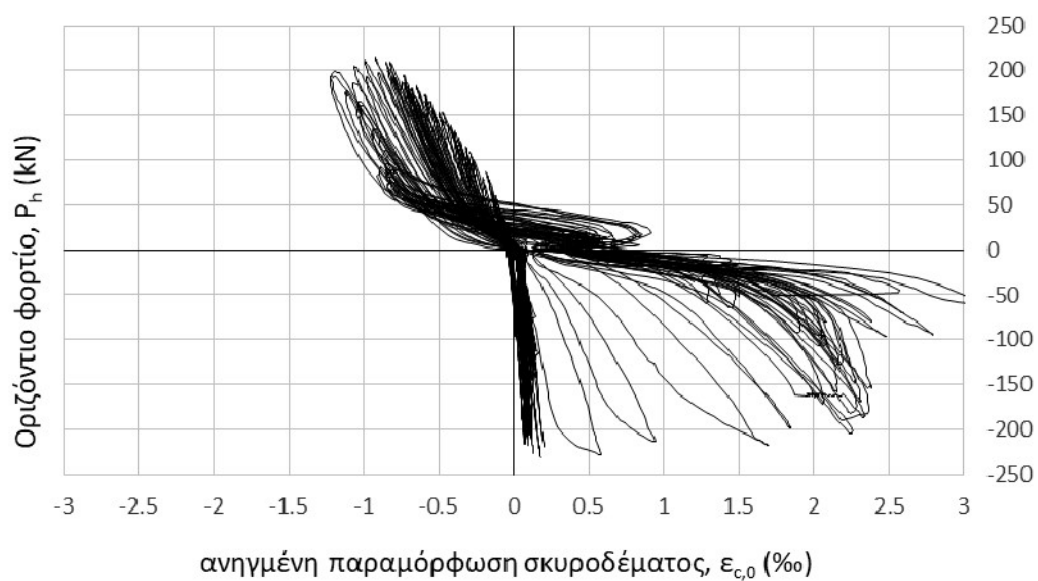
3.3.1. Παραμορφώσεις σκυροδέματος τοιχώματος

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανηγμένων παραμορφώσεων σκυροδέματος του τοιχώματος σε δώδεκα (12) επιλεγμένα σημεία κατά μήκος των 2 διαγωνίων του στην επιφάνεια του σκυροδέματος με ηλεκτρομηκυσσιόμετρα (strain gages) (βλ. Κεφ. 2). Εκτός από τις μετρήσεις στην διεύθυνση των διαγωνίων, έγιναν μετρήσεις και παράλληλα αυτών σε αποστάσεις $0.15L/2 = 113 \text{ mm}$ και $0.15L/4 = 56 \text{ mm}$ (όχι μεγαλύτερες του προτεινόμενου στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. πλάτους θλιπτήρα $0,15L=225 \text{ mm}$). Η ακριβής διάταξη φαίνεται στο Σχ. 3.10. Στα Σχ. 3.11-3.22 παρουσιάζονται τα διαγράμματα οριζόντιου φορτίου-ανηγμένης παραμόρφωσης σκυροδέματος για κάθε ηλεκτρομηκυσσιόμετρο.

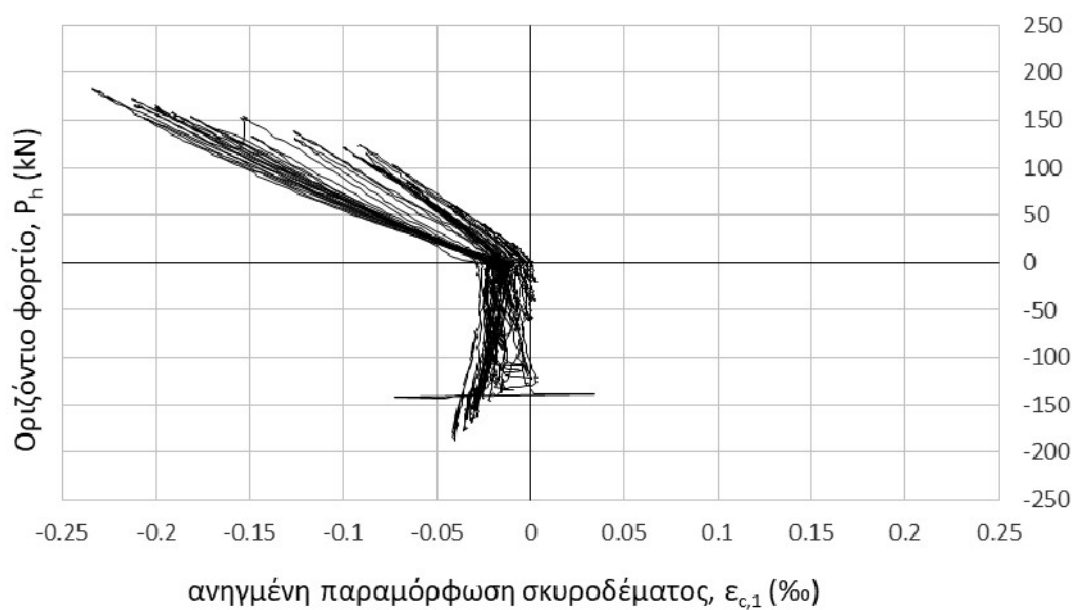
Τονίζεται ότι η διαγώνιος **G** είναι αυτή που θλίβεται για τη θετική κατεύθυνση φόρτισης, ενώ η διαγώνιος **L** η διαγώνιος που θλίβεται για την αρνητική κατεύθυνση φόρτισης.



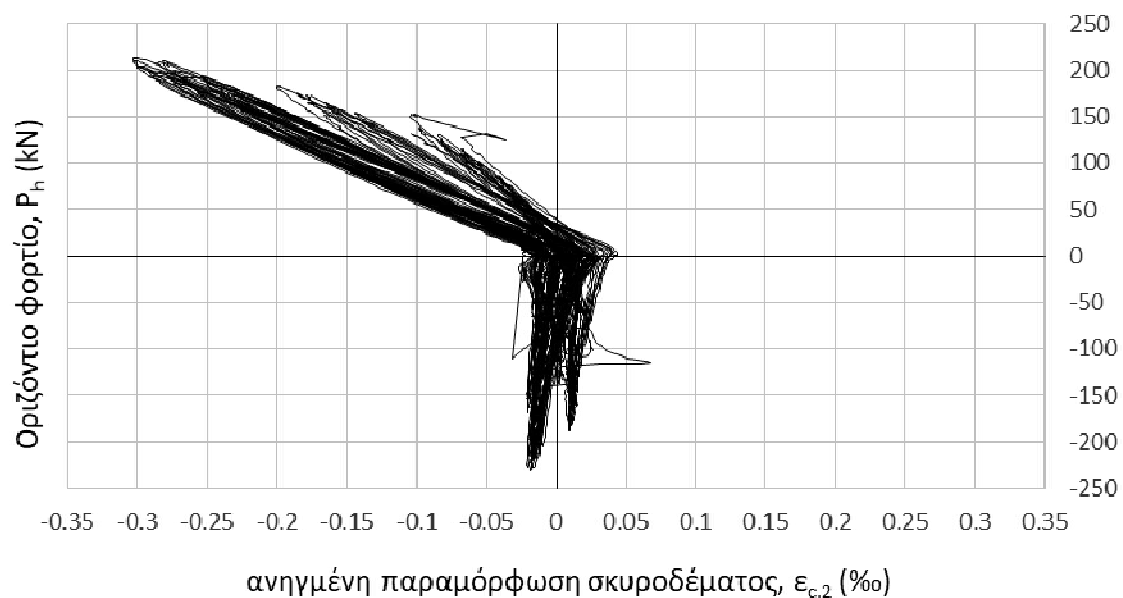
Σχήμα 3.10 - Θέσεις ηλεκτρομηκυσιομέτρων (sg's) δοκιμίου A8 (εμπρόσθια όψη - μήκη αποστάσεων σε mm).



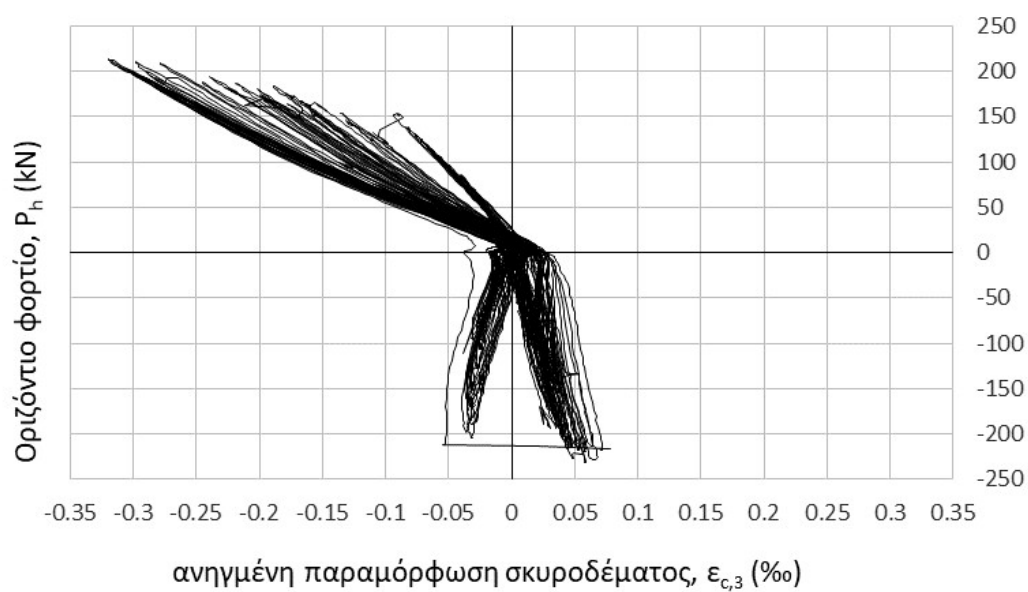
Σχήμα 3.11 – Ανηγγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος, $\epsilon_{c,0}$ στη διαγώνιο G.



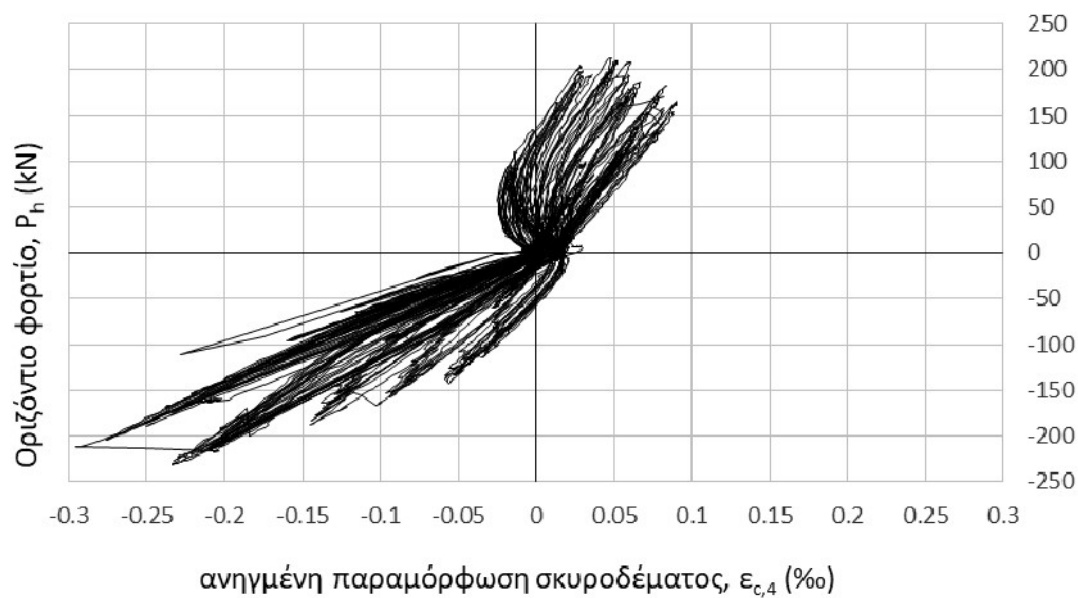
Σχήμα 3.12 – Ανηγγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος, $\epsilon_{c,1}$ στη διαγώνιο G.



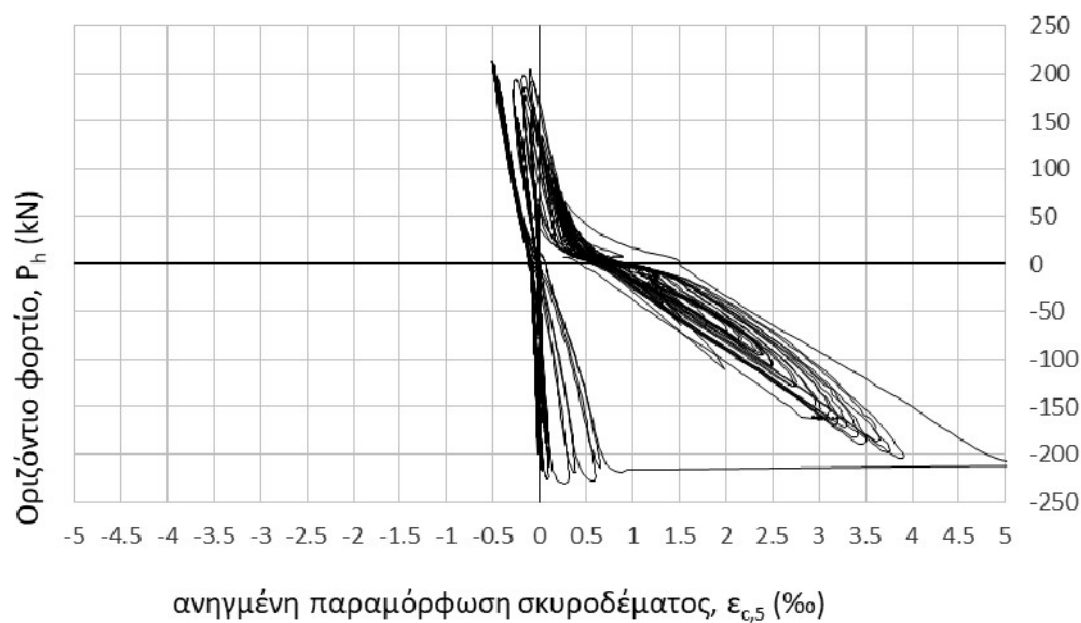
Σχήμα 3.13 – Ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος, $\epsilon_{c,2}$ στη διαγώνιο G.



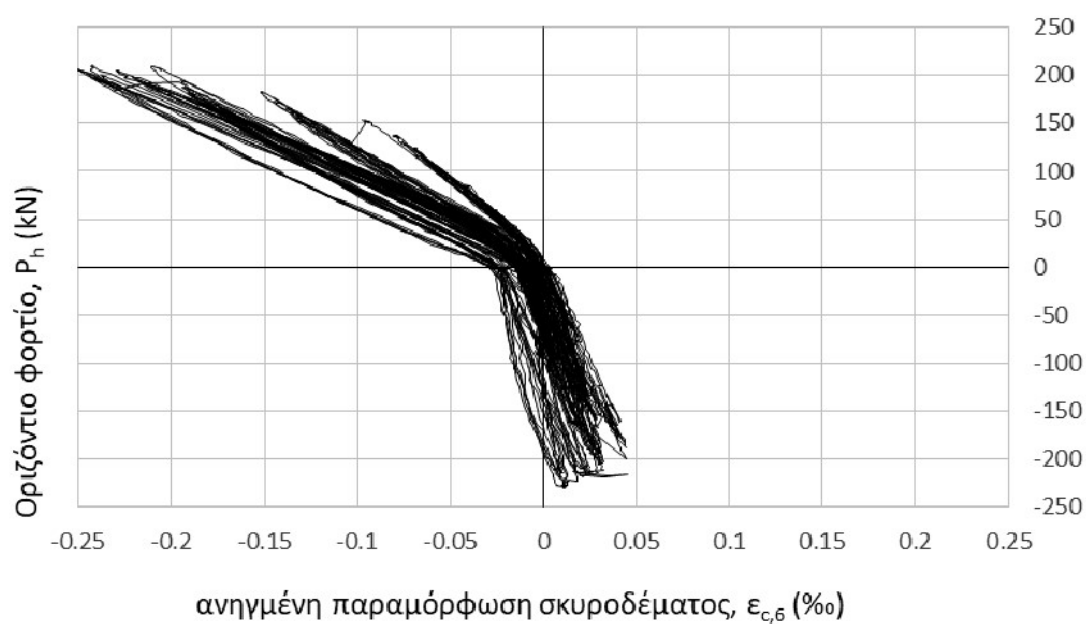
Σχήμα 3.14 – Ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος, $\epsilon_{c,3}$ στη διαγώνιο G.



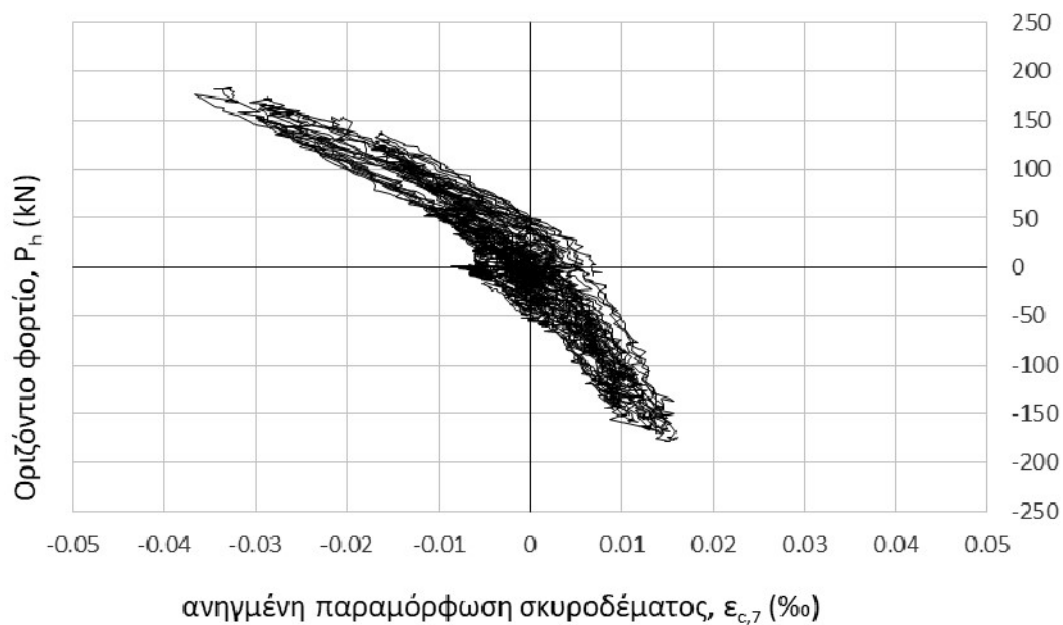
Σχήμα 3.15 – Ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος, $\epsilon_{c,4}$ στη διαγώνιο L.



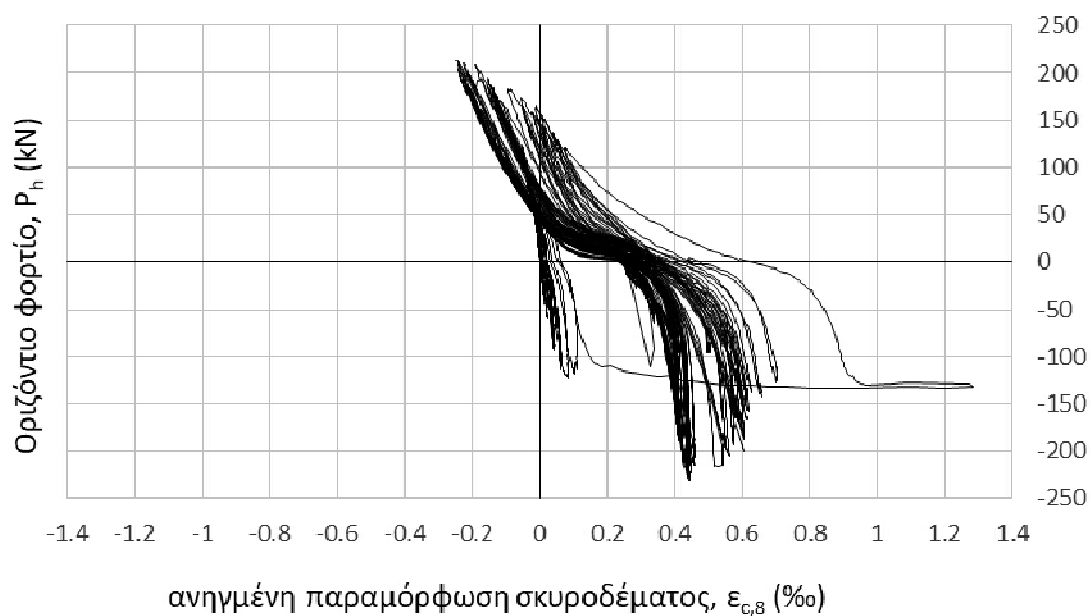
Σχήμα 3.16 – Ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος, $\epsilon_{c,5}$ στη διαγώνιο G.



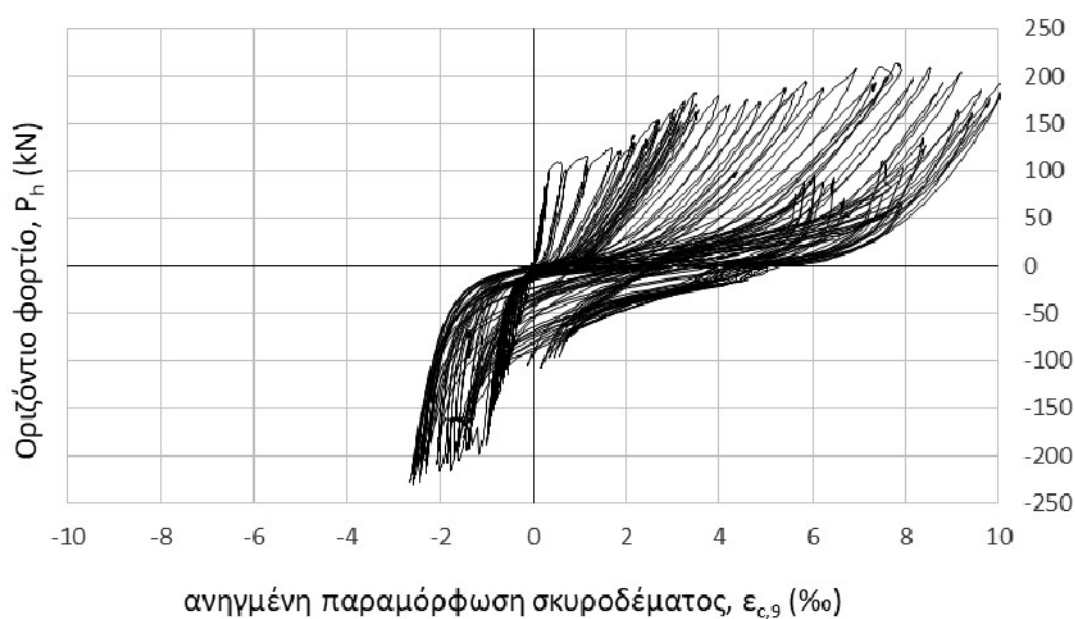
Σχήμα 3.17 – Ανηγγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος, $\epsilon_{c,6}$ στη διαγώνιο G.



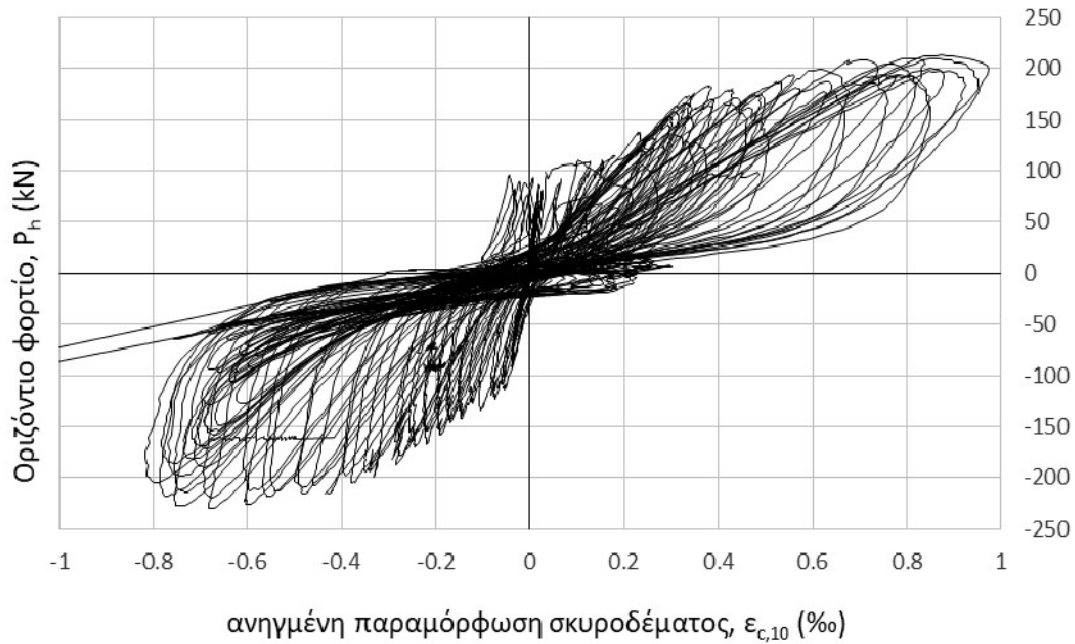
Σχήμα 3.18 – Ανηγγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος, $\epsilon_{c,7}$ στη διαγώνιο G.



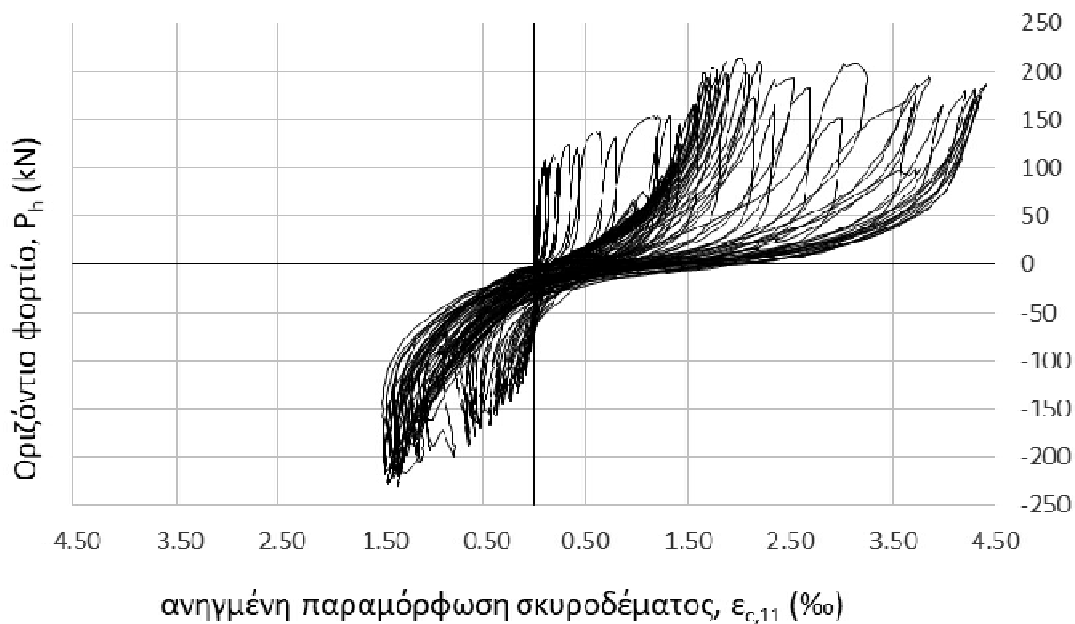
Σχήμα 3.19 – Ανηγγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος, $\epsilon_{c,8}$ στη διαγώνιο G.



Σχήμα 3.20 – Ανηγγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος, $\epsilon_{c,9}$ στη διαγώνιο L.



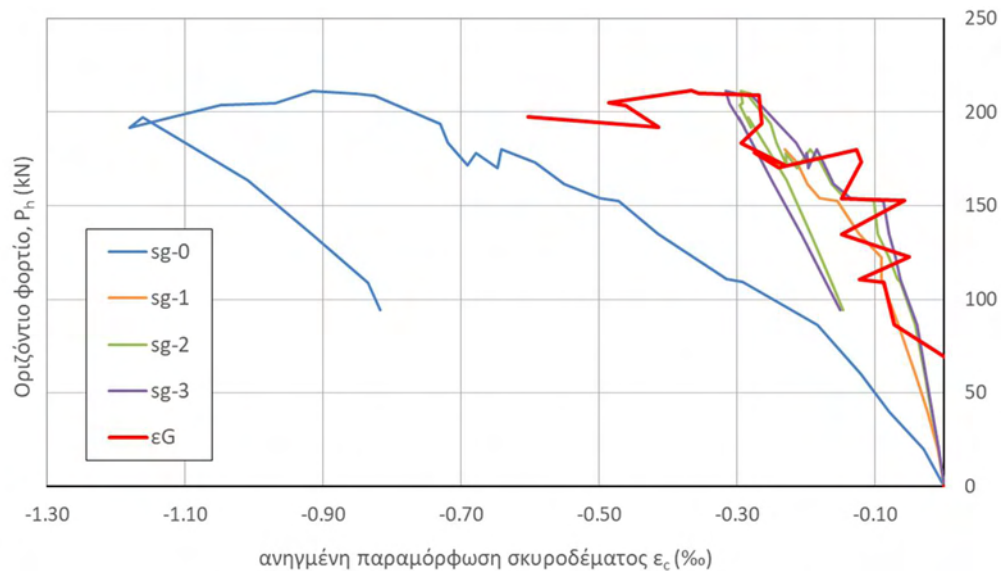
Σχήμα 3.21 – Ανηγγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος, $\varepsilon_{c,10}$ στη διαγώνιο L.



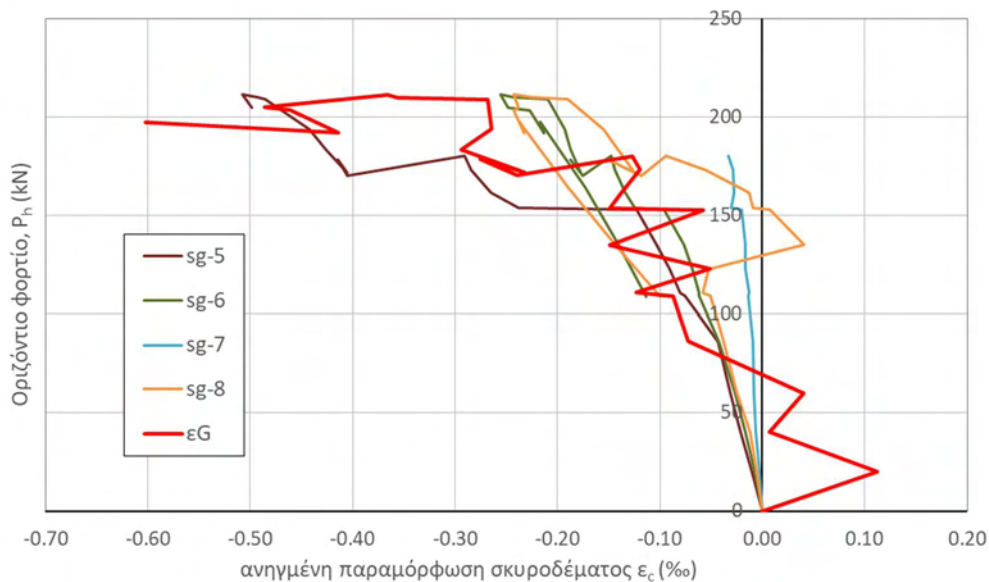
Σχήμα 3.22 – Ανηγγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος, $\varepsilon_{c,11}$ στη διαγώνιο L.

Στα Σχ. 3.23-3.28 περιλαμβάνονται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα που παρουσιάζουν την «τοπική» ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος στις επιλεγμένες θέσεις των sg's κατά μήκος ή παράλληλα κάθε διαγωνίου του τοιχώματος για κάθε επιβαλλόμενη οριζόντια

μετακίνηση συναρτήσει του αντίστοιχου οριζόντιου φορτίου για τον 1^ο κύκλο κάθε φόρτισης της δοκιμής. Στα Σχ. 3.23-3.26 περιλαμβάνονται και οι μετρήσεις για την ανηγμένη παραμόρφωση που προκύπτει από τα wire-gages (μηκυνσιόμετρα με σύρμα- wg's), η οποία αντιστοιχεί σε αρχικό μήκος μέτρησης ίσο σχεδόν με το συνολικό μήκος της αντίστοιχης διαγωνίου. Η τελευταία αποτελεί μια μέση ανηγμένη παραμόρφωση κατά μήκος των διαγωνίων του τοιχώματος.

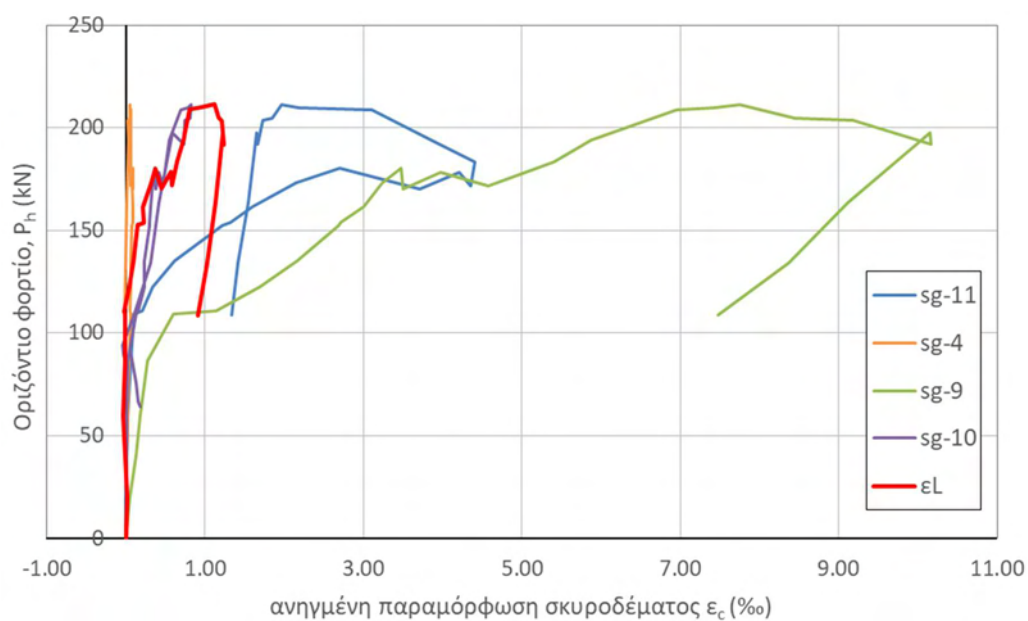


(α) sg-0, sg-1, sg-2, sg-3.

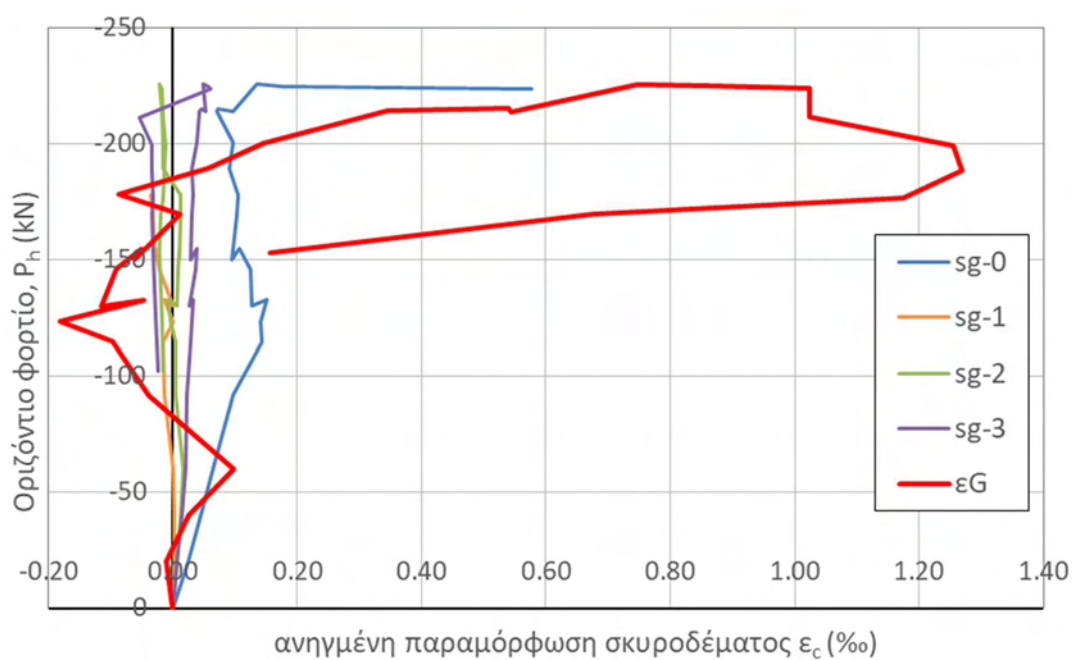


(β) sg-5, sg-6, sg-7, sg-8.

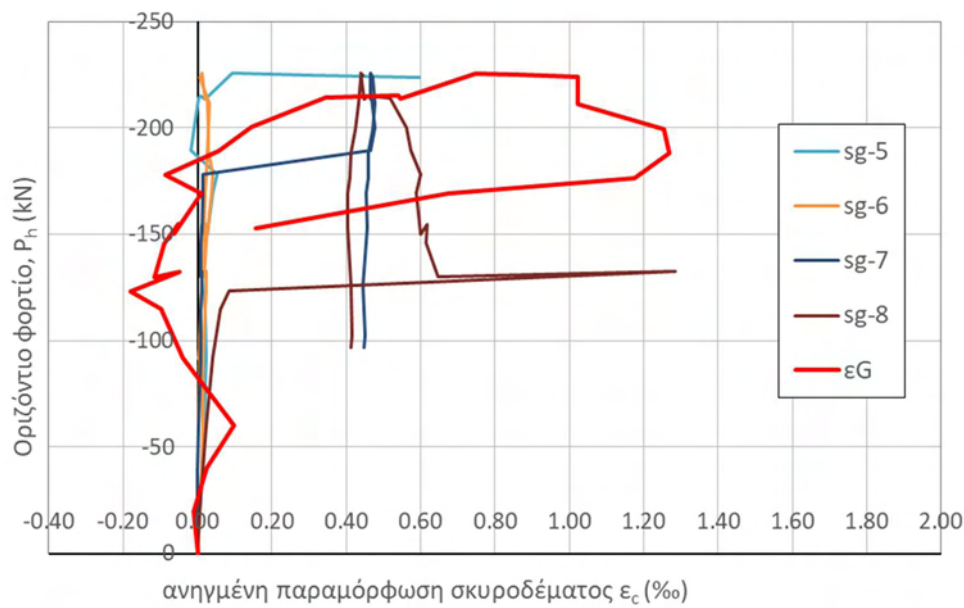
Σχήμα 3.23 – Ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος στη διαγώνιο G για τους πρώτους κύκλους της θετικής φόρτισης.



Σχήμα 3.24 – Ανεγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος (sg-4, sg-9, sg-10, sg-11) στη διαγώνιο L για τους πρώτους κύκλους της θετικής φόρτισης.

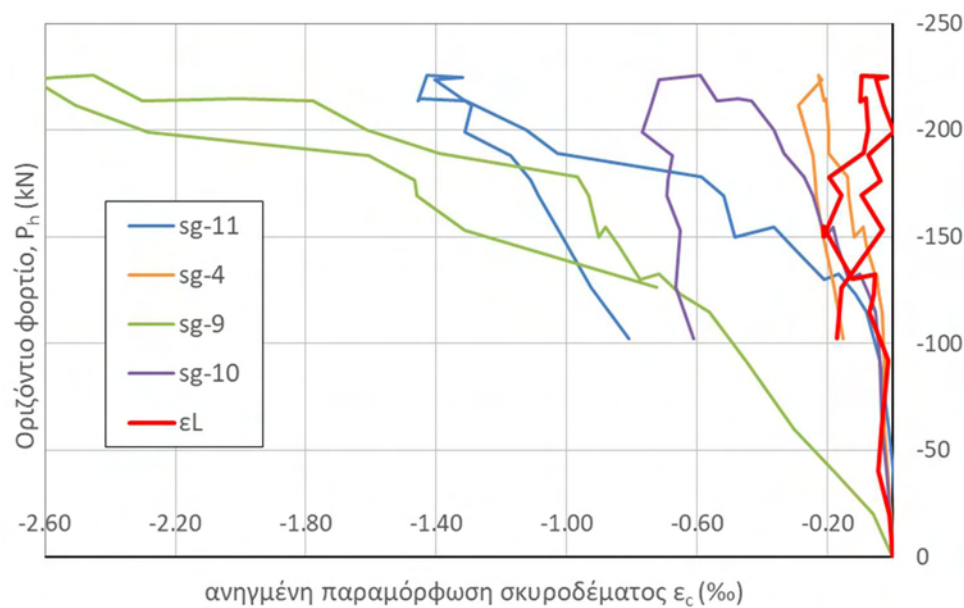


(α) sg-0, sg-1, sg-2, sg-3.



(β) sg-5, sg-6, sg-7, sg-8.

Σχήμα 3.25 – Ανηγγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος στη διαγώνιο G για τους πρώτους κύκλους της αρνητικής φόρτισης.



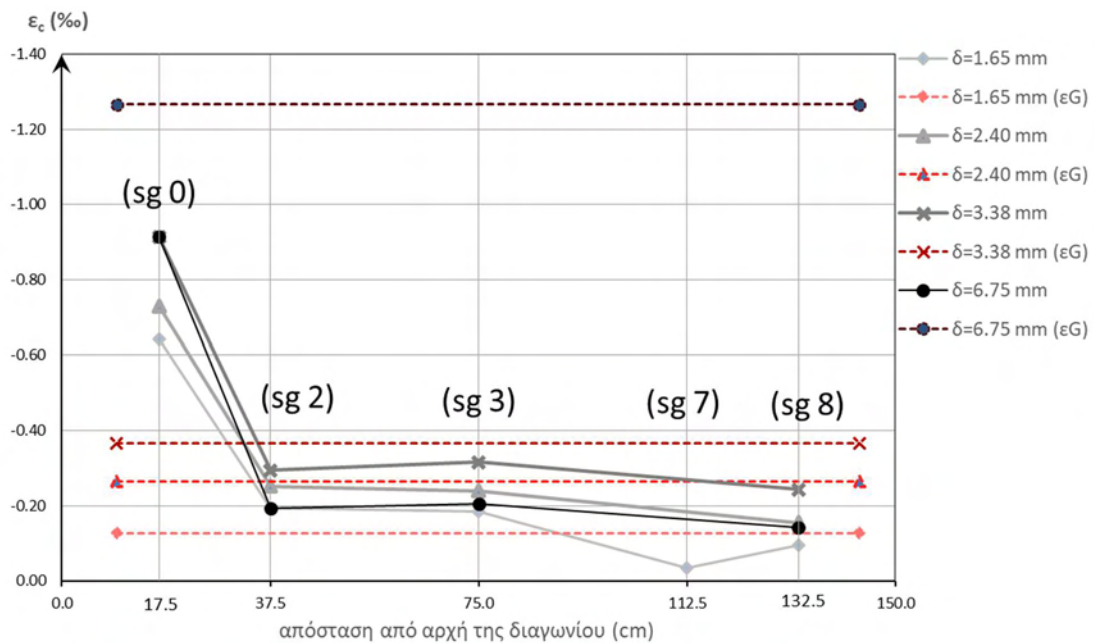
Σχήμα 3.26 – Ανηγγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος (sg-4, sg-9, sg-10, sg-11) στη διαγώνιο L για τους πρώτους κύκλους της αρνητικής φόρτισης.

Επίσης, στα Σχ. 3.27 έως 3.30 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ανηγμένων παραμορφώσεων σκυροδέματος (sg's) κατά μήκος κάθε διαγωνίου του τοιχώματος σε σχέση

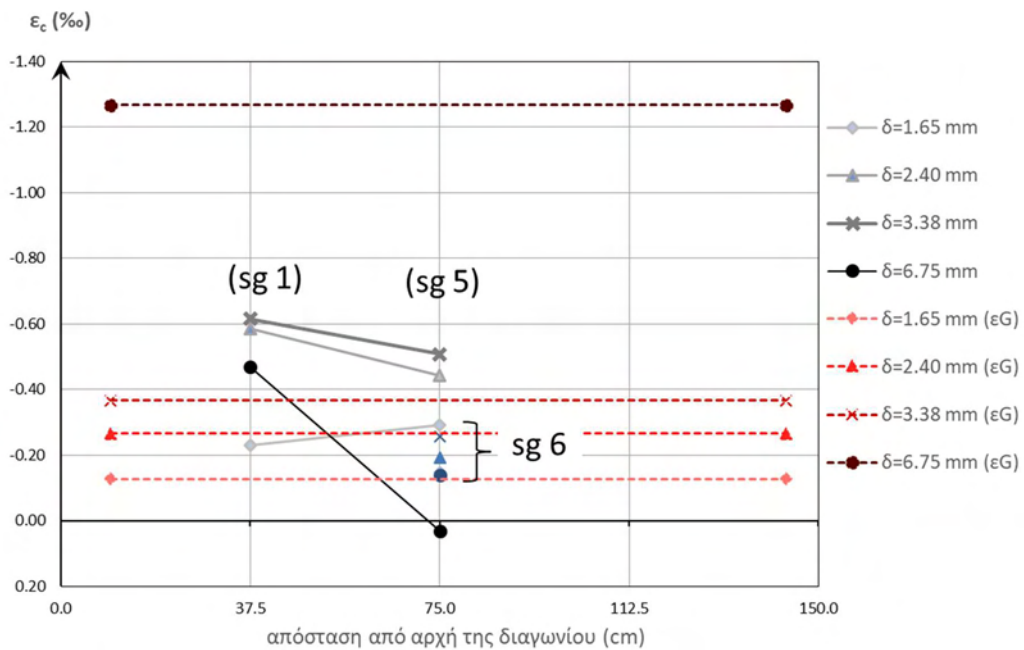
με τη θέση τους κατά μήκος της διαγωνίου σε τέσσερις (4) χαρακτηριστικές τιμές της επιβαλλόμενης οριζόντιας μετακίνησης για τον 1^ο κύκλο φόρτισης (θετική και αρνητική φόρτιση). Σε αυτά τα σχήματα περιλαμβάνονται και οι μέσες διαγώνιες ανηγμένες παραμορφώσεις των μετρήσεων των wg's.

Οι 4 χαρακτηριστικές αυτές τιμές της επιβαλλόμενης οριζόντιας μετακίνησης είναι (οι 3 πρώτες αναφέρονται στον ανιόντα κλάδο και η τέταρτη στο φθίνοντα κλάδο απόκρισης):

1. Μετακίνηση $\delta_h = +3.38$ mm για τη θετική και $\delta_h = -2.70$ mm για την αρνητική κατεύθυνση, στις οποίες επιτυγχάνεται η μέγιστη φέρουσα ικανότητα στην κάθε κατεύθυνση φόρτισης.
2. Μετακίνηση $\delta_h = +1.65$ mm για τη θετική και $\delta_h = -1.35$ mm για την αρνητική φόρτιση, που αντιστοιχούν περίπου στο ήμισυ των μετακινήσεων στο μέγιστο φορτίο.
3. Μετακίνηση $\delta_h = +2.40$ mm για τη θετική και $\delta_h = -1.95$ mm για την αρνητική φόρτιση, που αντιστοιχούν περίπου στο 75% των αντίστοιχων μετακινήσεων στο μέγιστο φορτίο.
4. Μετακίνηση $\delta_h = +6.75$ mm και $\delta_h = -5.25$ mm στον φθίνοντα κλάδο απόκρισης (περίπου διπλάσια τιμή μετακίνησης των αντίστοιχων στο μέγιστο φορτίο).

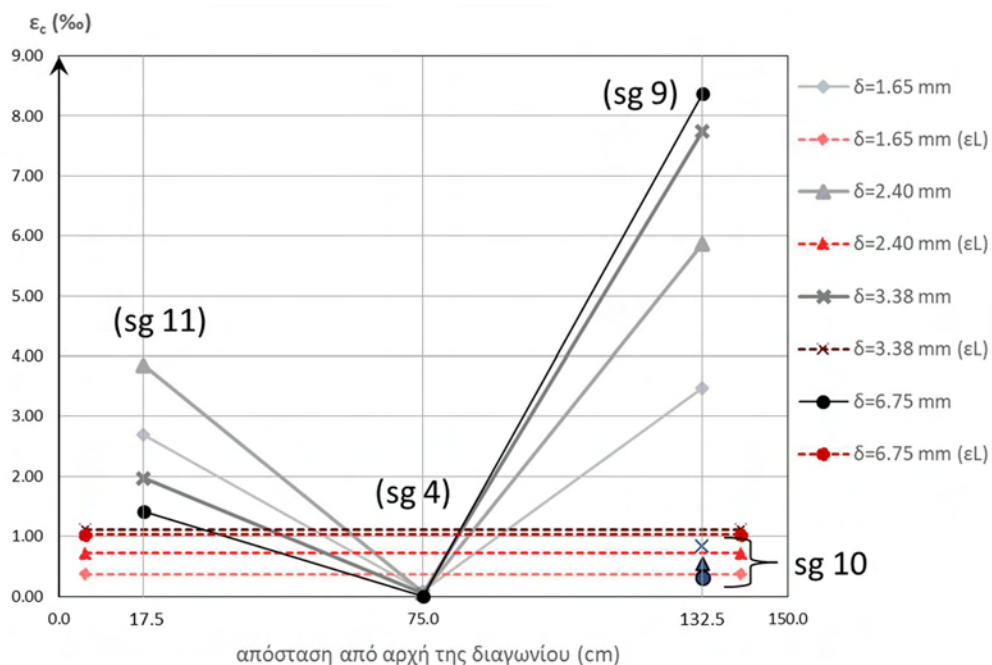


(α) sg-0, sg-2, sg-3, sg-7, sg-8.

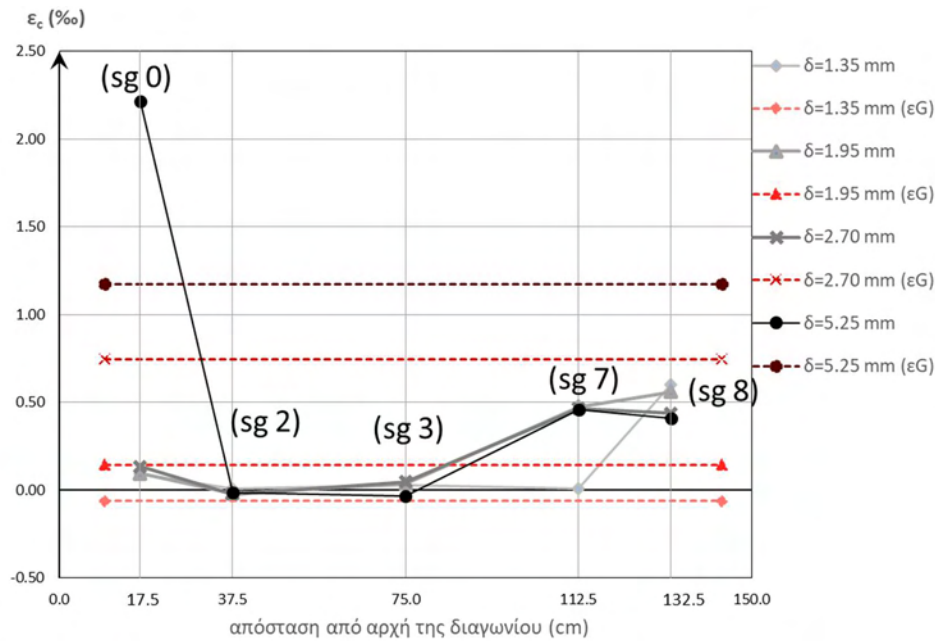


(β) sg-1, sg-5, sg-6.

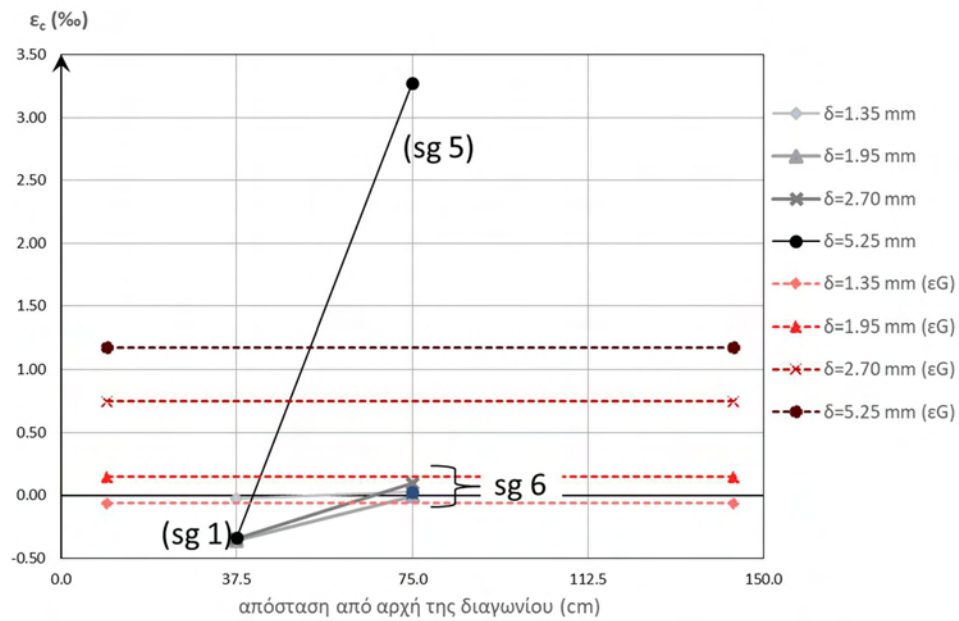
Σχήμα 3.27 – Ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος κατά μήκος θλιβόμενης διαγωνίου G για 1^{ος} κύκλος θετικής φόρτισης (διακεκομμένες για μέση διαγώνια παραμόρφωση, ϵ_G).



Σχήμα 3.28 – Ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος κατά μήκος της εφελκυσμένης διαγωνίου L για τους πρώτους κύκλους της θετικής φόρτισης (οι διακεκομμένες αντιστοιχούν στη μέση διαγώνια παραμόρφωση, ϵ_L).

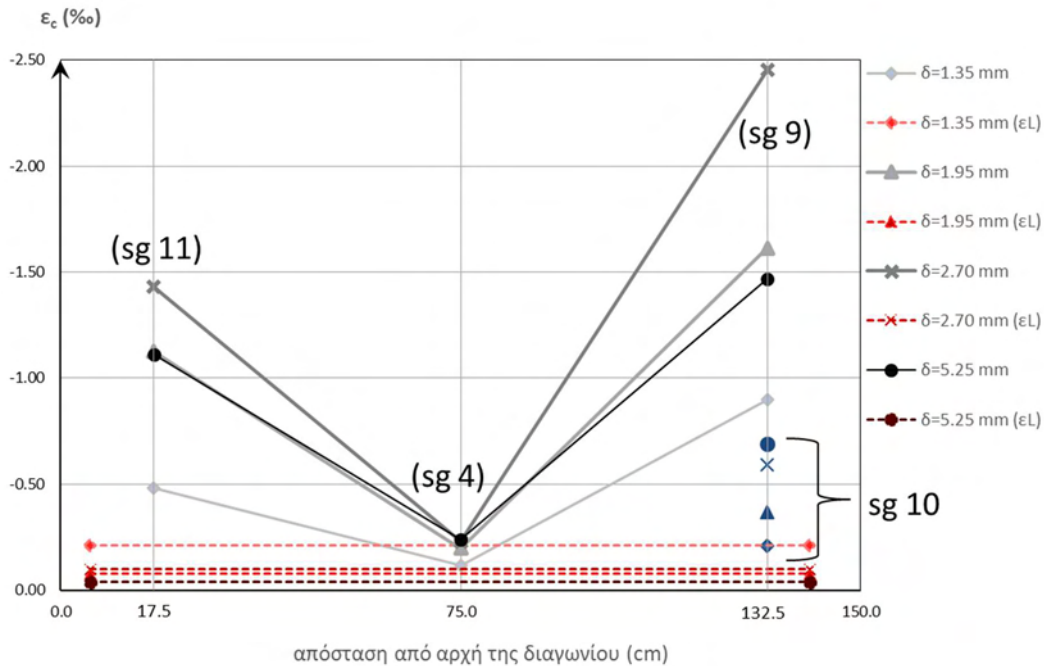


(α) sg-0, sg-2, sg-3, sg-7, sg-8.



(β) sg-1, sg-5, sg-6.

Σχήμα 3.29 – Ανηγγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος κατά μήκος της εφελκυσόμενης διαγωνίου G για τους πρώτους κύκλους της αρνητικής φόρτισης (οι διακεκομμένες αντιστοιχούν στη μέση διαγώνια παραμόρφωση, ε_G).



Σχήμα 3.30 – Ανηγγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος κατά μήκος της θλιβόμενης διαγωνίου L για τους πρώτους κύκλους της αρνητικής φόρτισης (οι διακεκομμένες αντιστοιχούν στη μέση διαγώνια παραμόρφωση, εL).

a) Θλιβόμενες διαγώνιοι τοιχώματος:

Παρατηρείται αρχικά, όπως φαίνεται και στα Σχ. 3.23, 3.27, ότι οι τιμές ανηγμένης παραμόρφωσης του wg-G (θλιβόμενη διαγώνιος για τη θετική φόρτιση) συμπίπτουν πρακτικά με αυτές των sg's στην αντίστοιχη διαγώνιο μέχρι το μέγιστο φορτίο. Στη θλιβόμενη διαγώνιο L για την αρνητική φόρτιση, οι τιμές της ανηγμένης παραμόρφωσης μέχρι το μέγιστο φορτίο είναι πολύ μικρότερες.

Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις, η μέση θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος, ε_c , κυμάνθηκε σε χαμηλές σχετικά τιμές από περίπου -0,2 έως -0,6‰. Εξάιρεση αποτελούν οι τιμές των sg's στις κάτω γωνίες του τοιχώματος και του sg στην άνω γωνία της διαγωνίου L, που αντιστοιχούν σε θλιπτική παραμόρφωση έως και -1,45‰. Η τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης σκυροδέματος στην κάτω γωνία της διαγωνίου G έφτασε μέχρι -1.2‰.

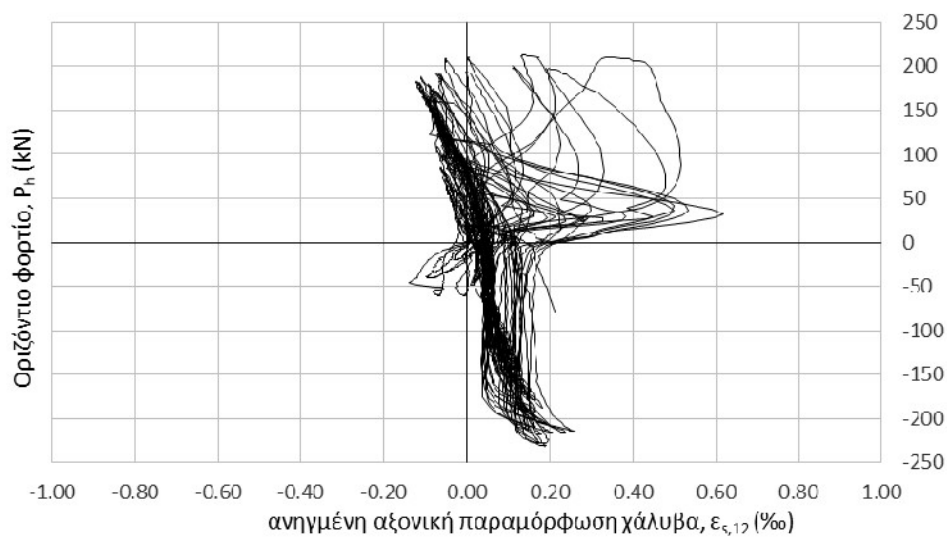
b) Εφελκόμενες διαγώνιοι τοιχώματος:

Όπως φαίνεται στα Σχ. 3.24, 3.25, 3.28 και 3.29, οι τιμές της ανηγμένης παραμόρφωσης των wg's, που αντιστοιχεί σε μία μέση παραμόρφωση κατά μήκος της αντίστοιχης διαγωνίου του τοιχώματος, κυμαίνονται κοντά στις τοπικές τιμές των sg's σε κάθε διαγώνιο μέχρι το μέγιστο φορτίο.

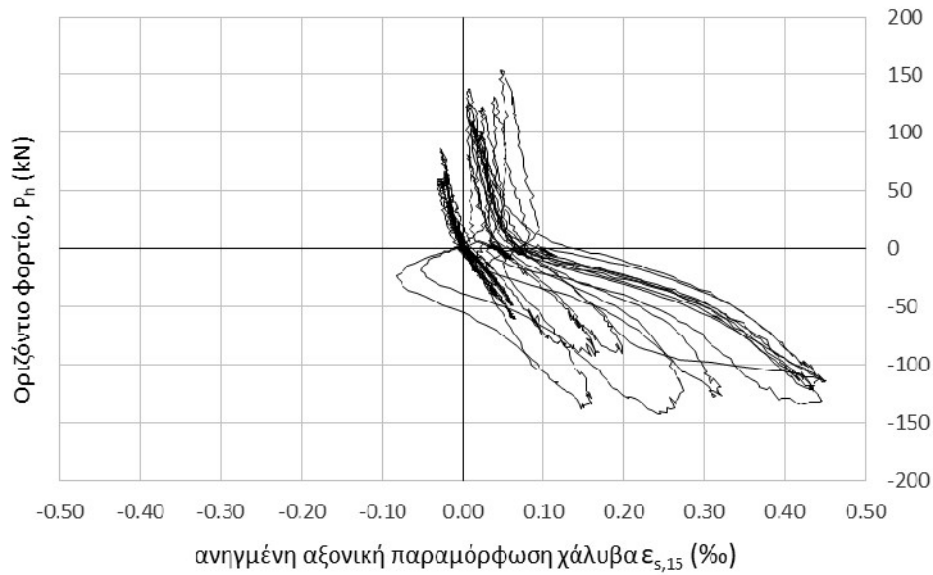
3.3.2. Παραμορφώσεις οπλισμού

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα σε δύο ράβδους οπλισμού με ηλεκτρομηκυνσιόμετρα, μία σε διαμήκη ράβδο στην αριστερή παρειά της βάσης του αριστερού υποστυλώματος (sg12) και μία σε μία διαγώνια ράβδο οπλισμού του πάνω αριστερού κόμβου του πλαισίου (sg15).

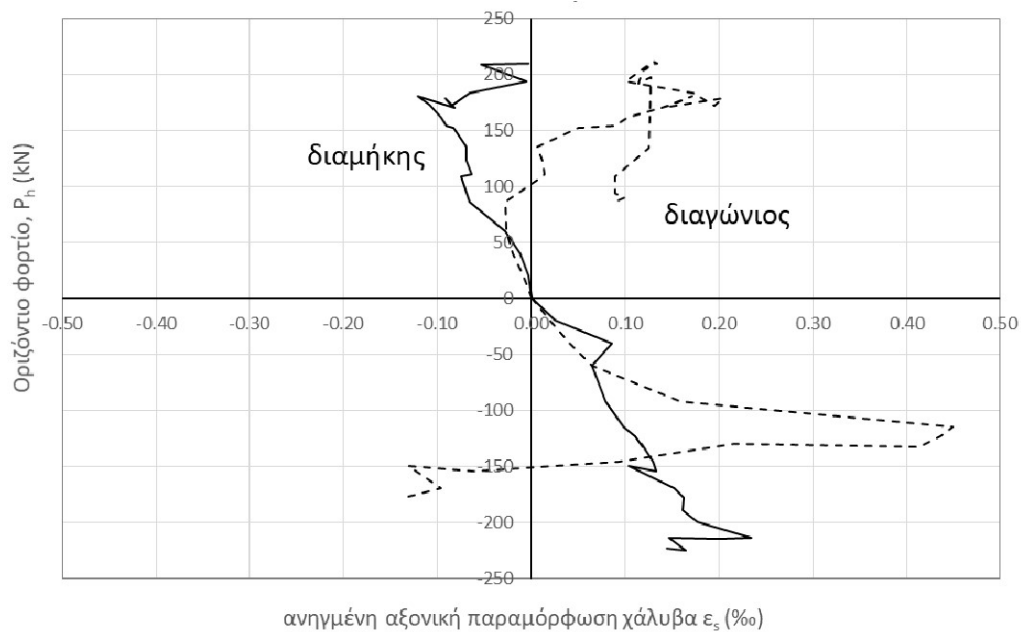
Στα Σχ. 3.31, 3.32 παρουσιάζονται τα διαγράμματα οριζόντιου φορτίου-ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης χάλυβα για κάθε ηλεκτρομηκυνσιόμετρο.



Σχήμα 3.31 – Ανηγμένη αξονική παραμόρφωση χάλυβα, $\varepsilon_{s,12}$, στη διαμήκη ράβδο της βάσης του αριστερού υποστυλώματος.



Σχήμα 3.32 – Ανηγγμένη αξονική παραμόρφωση χάλυβα, $\varepsilon_{s,15}$, στη διαγώνια ράβδο του πάνω αριστερού κόμβου του πλαισίου.



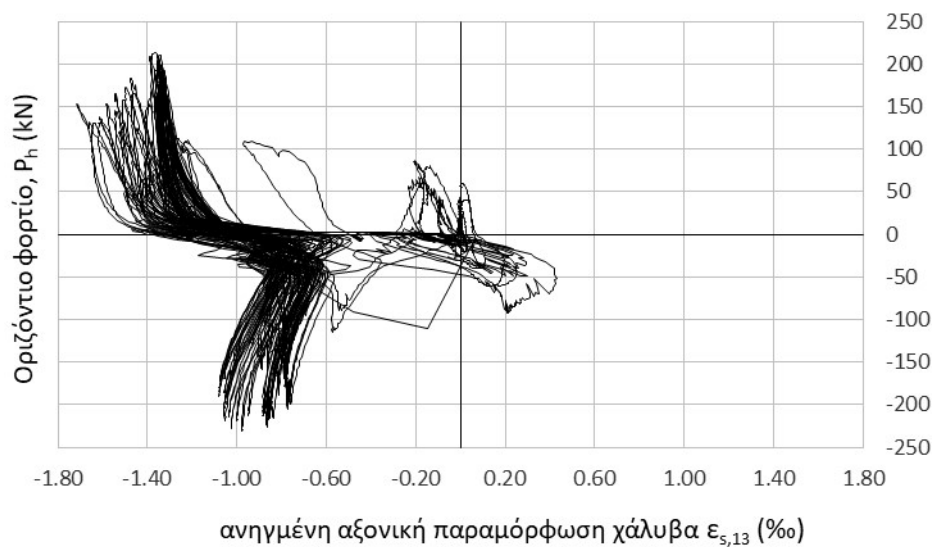
Σχήμα 3.33 – Περιβάλλουσα ανηγμένης παραμόρφωσης χάλυβα διαμήκους οπλισμού στη βάση υποστυλώματος, $\varepsilon_{s,12}$, και διαγώνιου οπλισμού στον αριστερό κόμβο, $\varepsilon_{s,15}$, για τον 1^ο κύκλο θετικής και αρνητικής φόρτισης.

3.3.3. Αξονικές παραμορφώσεις διατμητικών συνδέσμων

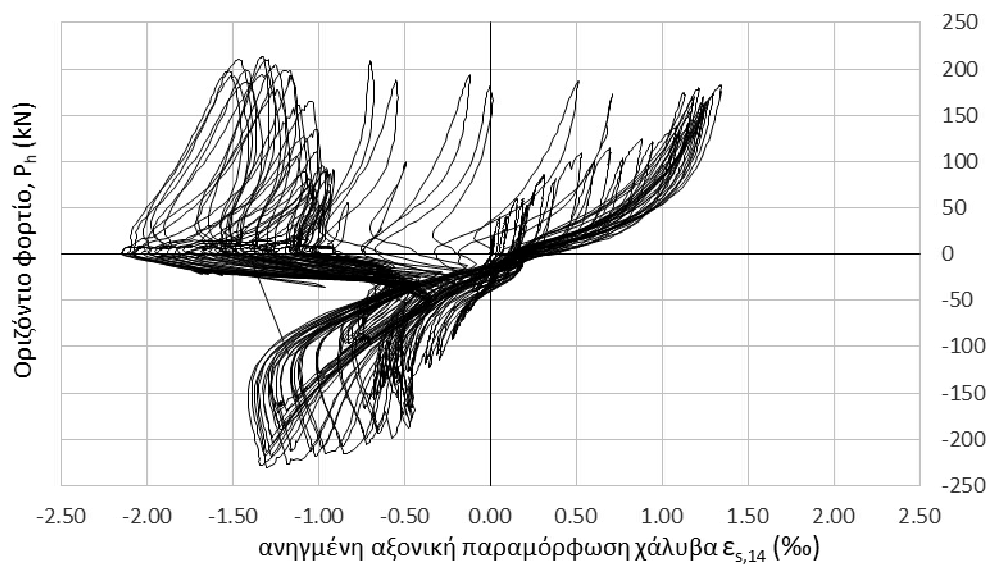
Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ανηγμένης παραμόρφωσης χάλυβα με ηλεκτρομηκυνσιόμετρα σε οκτώ (8) διατμητικούς συνδέσμους (βλήτρα) σε διεπιφάνειες του τοιχώματος με το περιβάλλον πλαίσιο: στους τέσσερις πρώτους κατακόρυφους συνδέσμους

στη δεξιά πλευρά της διεπιφάνειας τοιχώματος-βάσης (sg-20, 21, 22, 23), στους δύο πρώτους κατακόρυφους συνδέσμους στην αριστερή πλευρά της διεπιφάνειας τοιχώματος-δοκού πλαισίου (sg-16, 19) και στους δύο πρώτους οριζόντιους συνδέσμους στο πάνω ήμισυ της διεπιφάνειας τοιχώματος-αριστερού υποστυλώματος (sg-13, 14). Στο εξής οι διατμητικοί σύνδεσμοι θα αναφέρονται με τον αριθμό του sg που τοποθετήθηκε σε αυτούς.

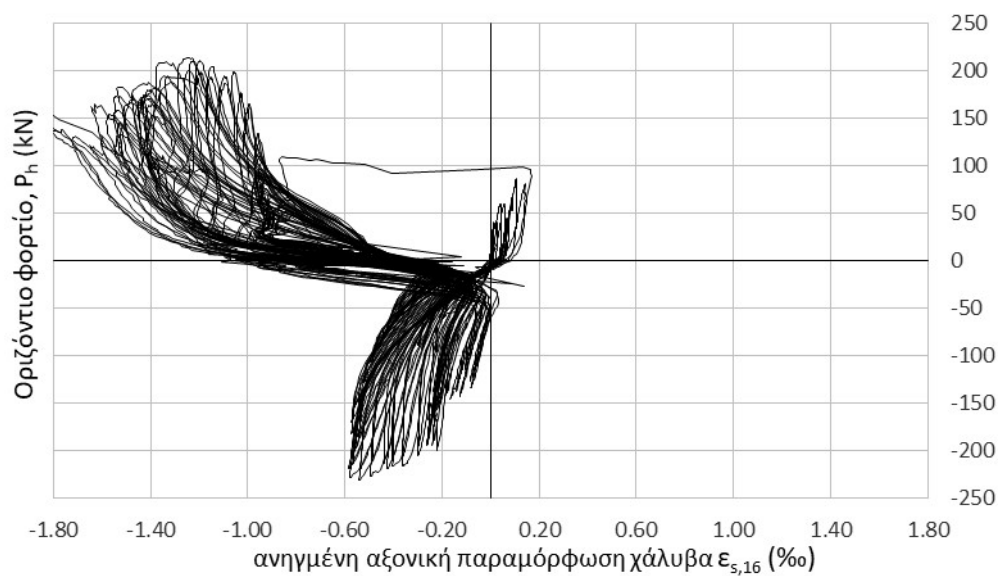
Στα Σχ. 3.34 έως 3.39 παρουσιάζονται τα διαγράμματα οριζόντιου φορτίου-ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης χάλυβα για κάθε sg. Παραλείπονται τα διαγράμματα για τους συνδέσμους 20 και 23, λόγω μη σωστής λειτουργίας των αντίστοιχων sg's.



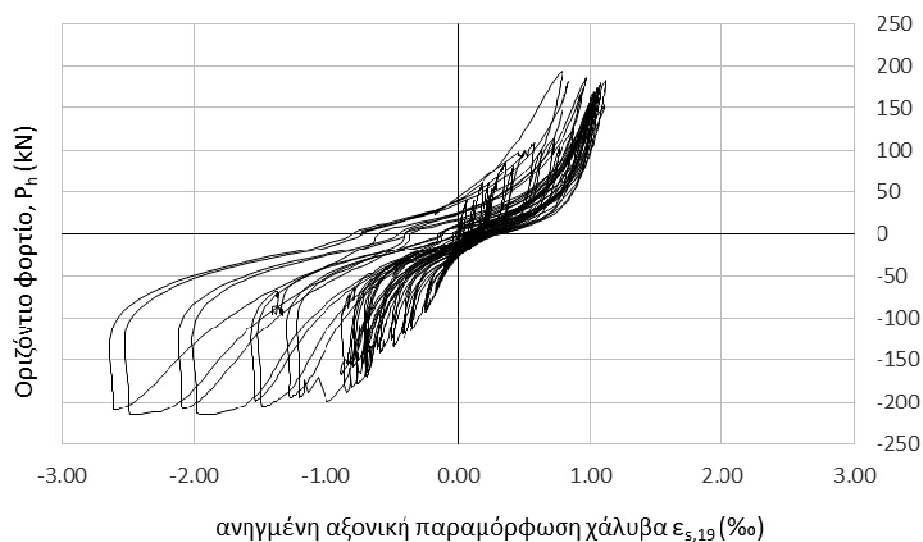
Σχήμα 3.34 – Ανηγμένη αξονική παραμόρφωση χάλυβα οριζόντιου διατμητικού συνδέσμου 13, ϵ_s , βλ-13.



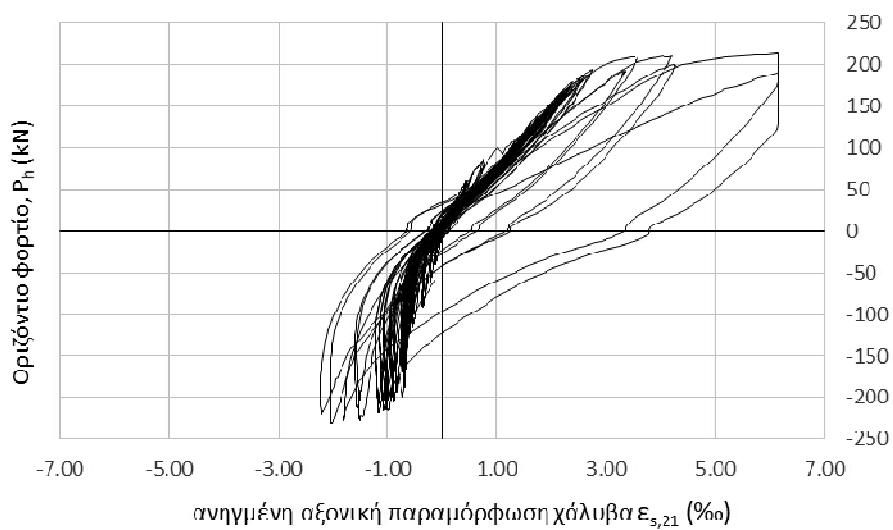
Σχήμα 3.35 – Ανηγγμένη αξονική παραμόρφωση χάλυβα οριζόντιου διατμητικού συνδέσμου 14, εβλ.σ-14.



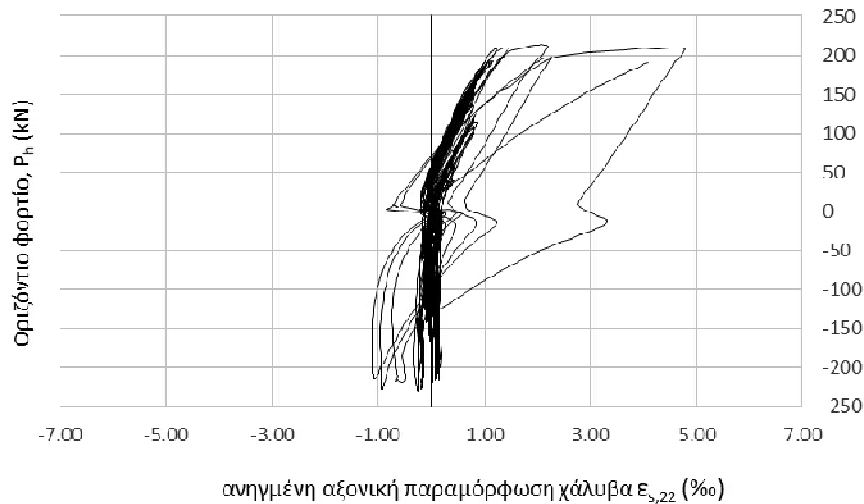
Σχήμα 3.36 – Ανηγγμένη αξονική παραμόρφωση χάλυβα του κατακόρυφου διατμητικού συνδέσμου 16, εβλ.σ-16.



Σχήμα 3.37 – Ανηγγμένη αξονική παραμόρφωση χάλυβα του κατακόρυφου διατμητικού συνδέσμου 19, εβλ._{s-19}.

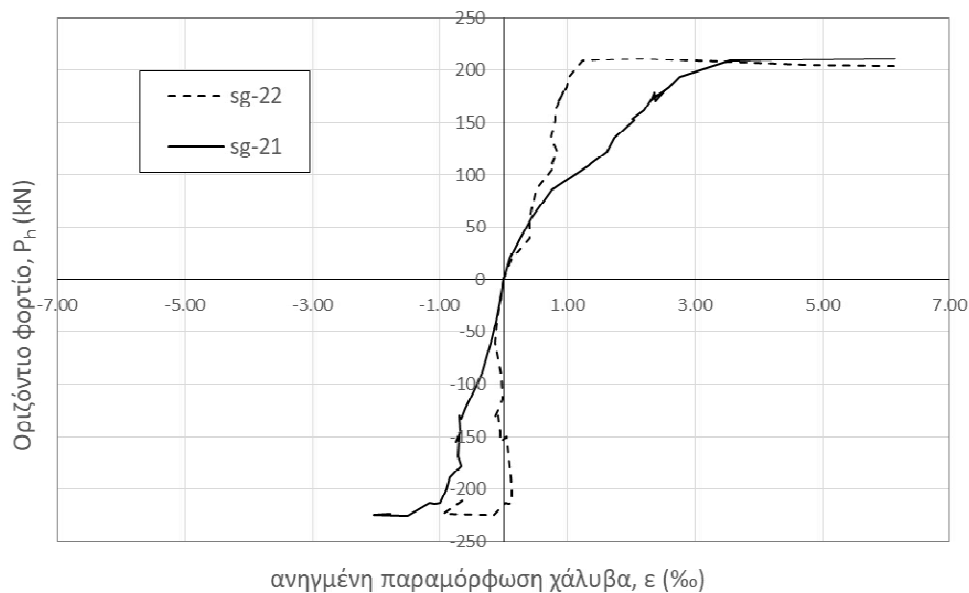


Σχήμα 3.38 – Ανηγγμένη αξονική παραμόρφωση χάλυβα του κατακόρυφου διατμητικού συνδέσμου 21, εβλ._{s-21}.



Σχήμα 3.39 – Ανηγμένη αξονική παραμόρφωση χάλυβα του κατακόρυφου διατμητικού συνδέσμου 22, εβλ.σ-22.

Στο Σχ. 3.40 παρουσιάζονται τα διαγράμματα οριζόντιου φορτίου-ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης χάλυβα, συναρτήσει της επιβαλλόμενης οριζόντιας μετακίνησης στον 1^ο κύκλο φόρτισης. Δεν συμπεριλαμβάνονται οι διατμητικοί σύνδεσμοι 13, 14, 16 και 19, διότι η πορεία μεταβολής των μετρήσεων κρίθηκε μη αξιόπιστη. Επίσης παραλείπονται οι σύνδεσμοι 20 και 23, λόγω μη σωστής λειτουργίας των αντίστοιχων sg's.

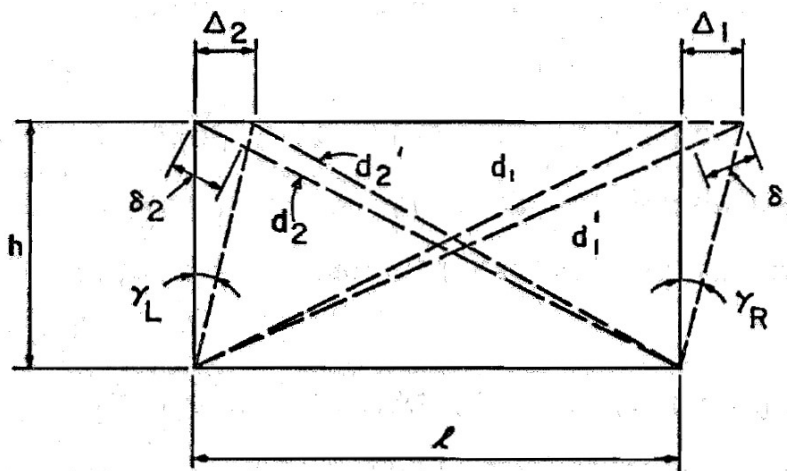


Σχήμα 3.40 – Ανηγμένη παραμόρφωση χάλυβα διατμητικών συνδέσμων κάτω διεπιφάνειας τοιχώματος-βάσης στον 1^ο κύκλο συναρτήσεως του οριζόντιου φορτίου.

3.4. Διατμητική Παραμόρφωση Τοιχώματος και Πλαισίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο ομάδες διαγραμμάτων, οι οποίες αναφέρονται στις παραμορφώσεις των διαγωνίων του τοιχώματος και του πλαισίου με βάση τις μετρήσεις των w 's G , L και R , S , αντίστοιχα. Η πρώτη ομάδα είναι διαγράμματα του οριζόντιου φορτίου συναρτήσει των διατμητικών (γωνιακών) παραμορφώσεων (Σχ. 3.43, 3.44) και η δεύτερη διαγράμματα των διατμητικών (γωνιακών) παραμορφώσεων συναρτήσει της επιβαλλόμενης σχετικής μετακίνησης του δοκιμίου, $d = \delta_h/h$ (Σχ. 3.45 έως 3.47). Το ανηγμένο μέγεθος d (drift) είναι ο λόγος της επιβαλλόμενης οριζόντιας μετακίνησης του δοκιμίου προς την κατακόρυφη απόσταση του σημείου φόρτισης από τη βάση του πλαισίου, $h = 82,5$ cm. Επιπλέον, στο Σχ. 3.42 παρουσιάζεται διάγραμμα του οριζόντιου φορτίου συναρτήσει της μέσης ανηγμένης παραμόρφωσης κατά μήκος των διαγωνίων του τοιχώματος.

Η μετατροπή των μετρήσεων μεταβολής μήκους των διαγωνίων από τα wire gages σε γωνιακές (διατμητικές) παραμορφώσεις πλαισίου και τοιχώματος γίνεται με βάση τη σχέση των Oosterle et al. (1976) και την παραδοχή παραμόρφωσης λόγω καθαρής διάτμησης. Η παραμόρφωση αυτή για ένα ορθογωνικό στοιχείο Ο/Σ φαίνεται σχηματικά στο Σχ. 3.41.



Σχήμα 3.41 – Σχηματική απεικόνιση διατμητικής παραμόρφωσης τοιχώματος και πλαισίου λόγω καθαρής διάτμησης.

Με βάση το Σχ. 3.41 ισχύουν οι Σχέσεις (3.1) έως (3.4).

$$\gamma_R = \frac{\Delta_1}{h} \quad \text{και} \quad \gamma_L = \frac{\Delta_2}{h} \quad (3.1)$$

$$\gamma_{Avg.} = \frac{\gamma_R + \gamma_L}{2} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2h} \quad (3.2)$$

$$\text{Αλλά επειδή ισχύει ότι} \quad \frac{\Delta_1}{\delta_1} = \frac{d_1}{\ell} \quad \text{και} \quad \frac{\Delta_2}{\delta_2} = \frac{d_2}{\ell} \quad (3.3)$$

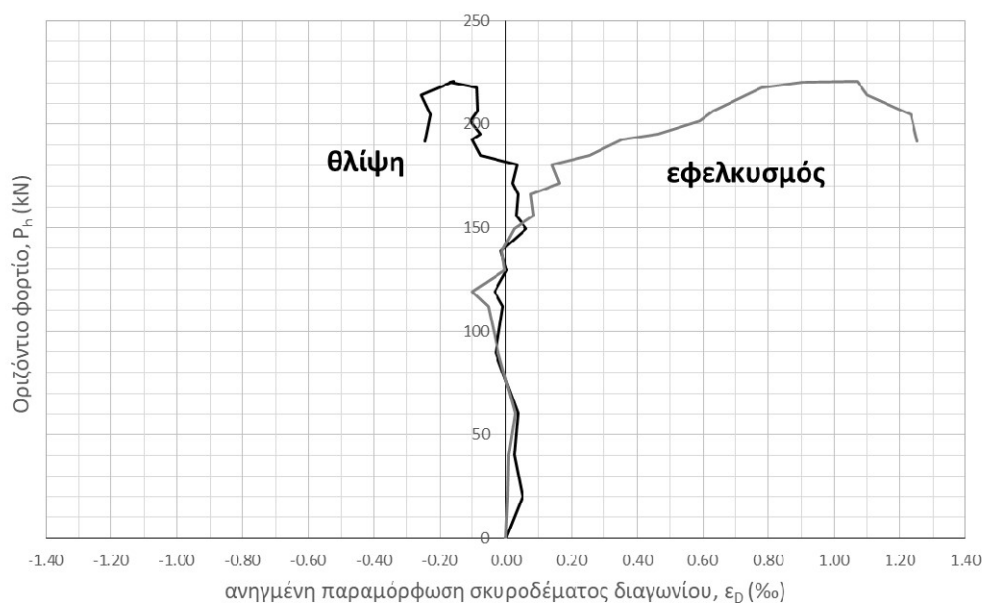
όπου $\delta_1 = d_1' - d_1$ και $\delta_2 = d_2' - d_2$ οι παραμορφώσεις των διαγωνίων (μεταβολή μήκους), οι οποίες μετρήθηκαν με τα ws's, προκύπτει ότι η μέση διατμητική παραμόρφωση του ορθογωνικού στοιχείου είναι:

$$\gamma_{Avg.} = \frac{\delta_1 d_1 + \delta_2 d_2}{2h\ell} \quad (3.4)$$

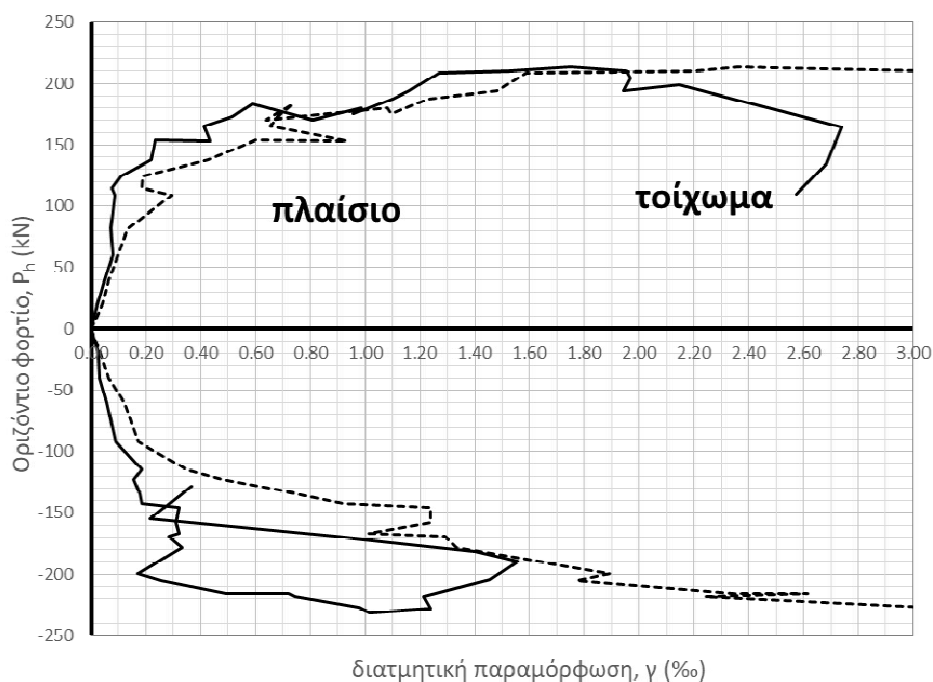
Η επιρροή της μεταβολής μήκους μόνο της μίας διαγωνίου (για παράδειγμα της D_1) στη διατμητική παραμόρφωση είναι:

$$\gamma_R = \frac{\delta_1 d_1}{h\ell} \quad (3.5)$$

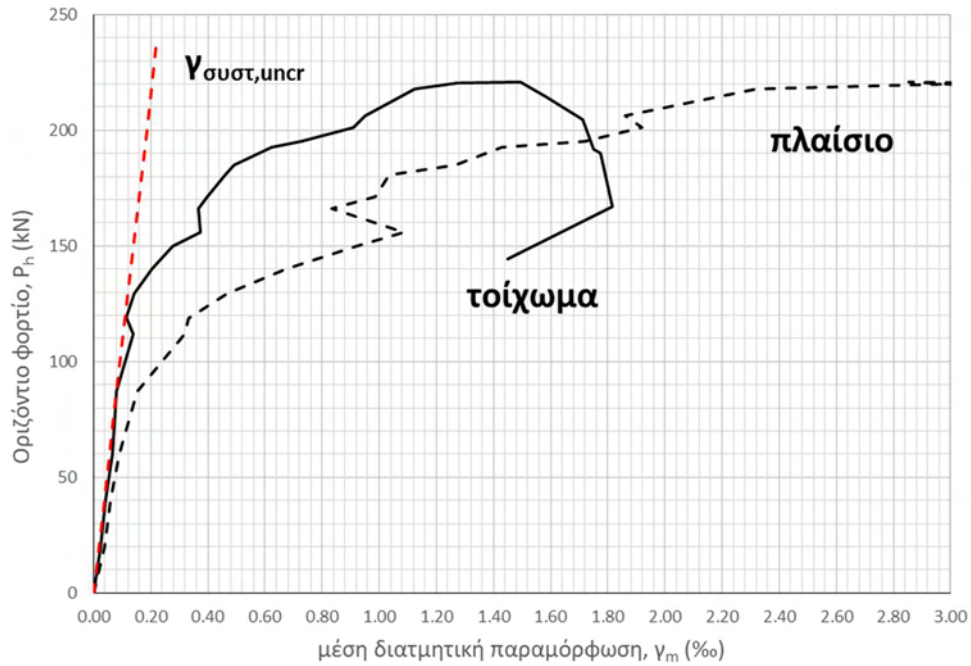
Στα Σχ. 3.45 έως 3.47 συμπεριλαμβάνεται για σύγκριση η «οριακή» καθαρά διατμητική παραμόρφωση ενός πλαισίου με πλαστικές «αρθρώσεις» στους κόμβους και μηδενική συνεργασία με το τοίχωμα, $\gamma_{mech} = \delta_h/h$, η οποία αναφέρεται ως «πλαίσιακός μηχανισμός», και δεν είναι τίποτε άλλο από τη σχετική μετακίνηση (drift) του πλαισίου, d_h . Επίσης, στο Σχ. 3.44 συμπεριλαμβάνεται για σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα μία ευθεία γραμμή, που περιγράφει τη γραμμική συμπεριφορά ενός ενιαίου συστήματος «πλαίσιο-τοίχωμα» με υπόθεση αρηγμάτωτης διατομής σε καθαρή διάτμηση. Αυτή η θεωρητική ευθεία γραμμή έχει κλίση, $P_h/\gamma_{\text{συστ.,uncr}} = A_w G \approx 1062 \text{ MN/rad}$, όπου $A_w = 0.085 \text{ m}^2$ είναι το εμβαδόν της συνολικής οριζόντιας διατομής πλαισίου-τοιχώματος στη βάση του δοκιμίου, P_h οριζόντιο φορτίο στην περιοχή της γραμμικής απόκρισης και $G = 12.50 \text{ GPa}$ το μέτρο διάτμησης σκυροδέματος του συστήματος πλαισίου-τοιχώματος, που εκτιμήθηκε με βάση τα μέτρα διάτμησης σκυροδέματος του τοιχώματος και πλαισίου.



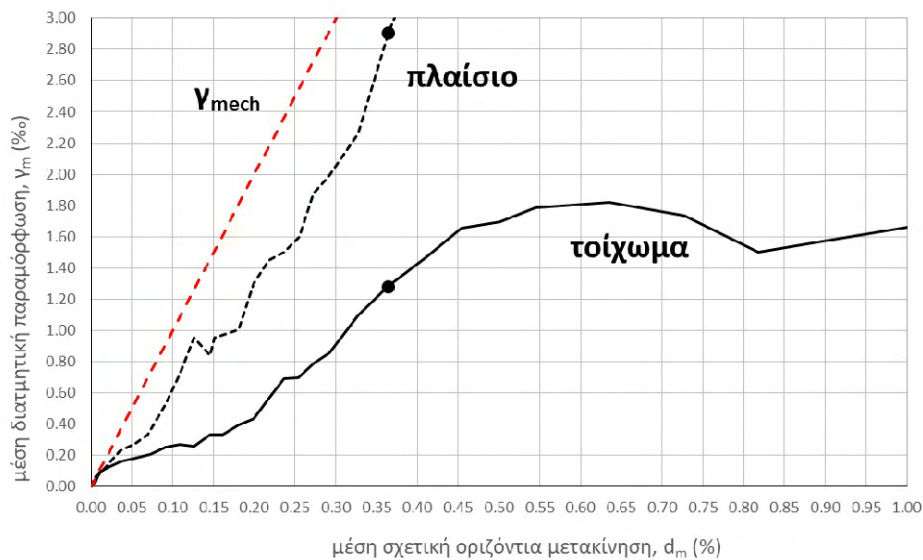
Σχήμα 3.42 – Μέση ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος ϵ_c στη διεύθυνση των διαγωνίων του τοιχώματος υπό θλίψη και εφελκυσμό (μέση τιμή για G και L) συναρτήσει μέσου επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου (δοκίμιο A8).



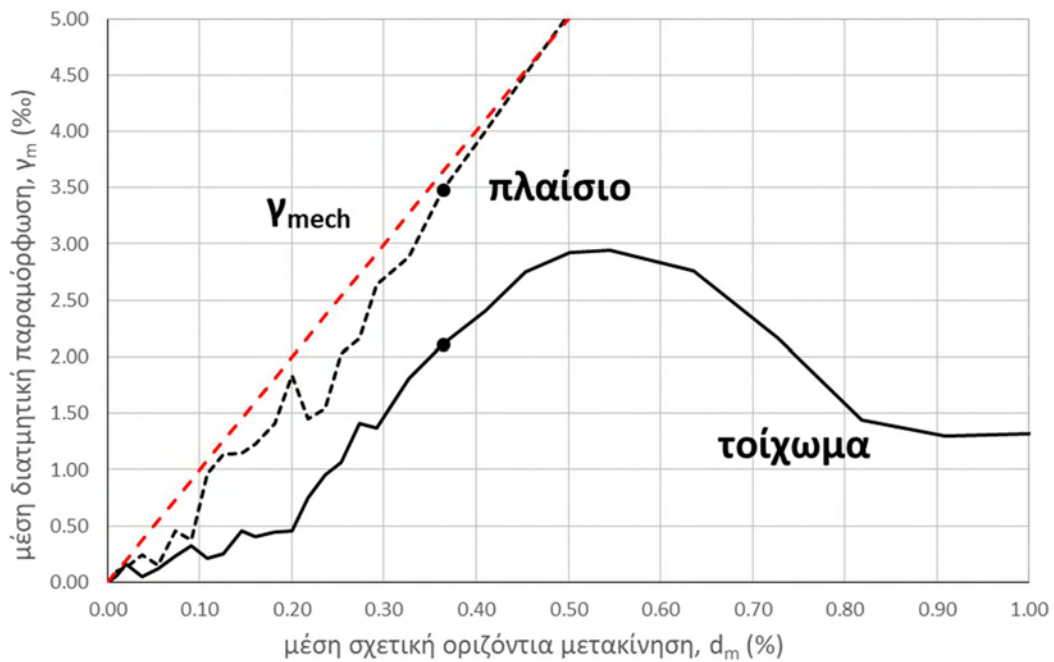
Σχήμα 3.43 – Επιβαλλόμενο οριζόντιο φορτίο συναρτήσει μέσης διατμητικής παραμόρφωσης τοιχώματος (συνεχής γραμμή) και πλαισίου (διακεκομμένη) για 1^ο κύκλο θετικής και αρνητικής φόρτισης (δοκίμιο A8).



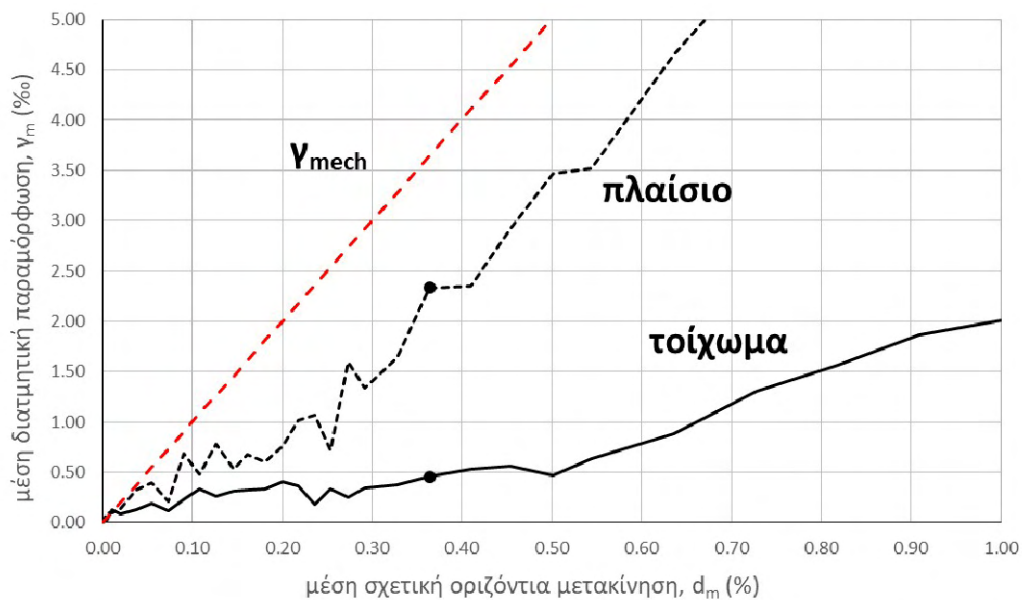
Σχήμα 3.44 – Μέσο επιβαλλόμενο οριζόντιο φορτίο συναρτήσει μέσης διατμητικής παραμόρφωσης τοιχώματος και πλαισίου (διακεκομμένη) για 1^ο κύκλο φόρτισης (δοκίμιο A8).



Σχήμα 3.45 – Μέση διατμητική παραμόρφωση, γ (%), τοιχώματος και πλαισίου δοκιμίου A8 συναρτήσει της μέσης επιβαλλόμενης οριζόντιας σχετικής μετακίνησης, d (%), για 1^ο κύκλο φόρτισης (το σημείο στις καμπύλες αντιστοιχεί στη μέση μέγιστη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου).



Σχήμα 3.46 – Μέση διατμητική παραμόρφωση, γ (%), λόγω παραμόρφωσης εφελκυσόμενων διαγωνίων τοιχώματος και πλαισίου συναρτήσει επιβαλλόμενης οριζόντιας σχετικής μετακίνησης, d (%), για 1ο κύκλο φόρτισης (δοκίμιο A8).



Σχήμα 3.47 – Μέση διατμητική παραμόρφωση, γ_m (%), λόγω παραμόρφωσης μόνο θλιβόμενων διαγωνίων τοιχώματος και πλαισίου συναρτήσει επιβαλλόμενης οριζόντιας σχετικής μετακίνησης, d (%), για 1^ο κύκλο φόρτισης (δοκίμιο A8).

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχ. 3.42, η μέση εφελκυστική και θλιπτική αξονική παραμόρφωση κατά μήκος των 2 διαγωνίων του τοιχώματος είναι παρόμοιες και δεν ξεπερνούν κατ' απόλυτη τιμή το 0.1‰ μέχρι μέσο επιβαλλόμενο φορτίο περίπου 150 kN ($\approx 0.68P_{h,max}^m$). Στο μέγιστο φορτίο η μέση θλιπτική αξονική παραμόρφωση πλησιάζει τη τιμή -0.15 ‰, ενώ η μέση εφελκυστική τη τιμή 1.10‰.

Στο Σχ. 3.44, που παρουσιάζεται το διάγραμμα μέσου φορτίου-μέσης διατμητικής παραμόρφωσης τοιχώματος και πλαισίου λόγω των παραμορφώσεων και των δύο διαγωνίων και για τις 2 κατευθύνσεις φόρτισης, παρατηρείται ότι το τοίχωμα παραμορφώνεται μαζί με το πλαίσιο (πλήρης σύνδεση) μέχρι ένα φορτίο περίπου 50 kN ($\approx 0.23P_{h,max}^m$), ενώ μέχρι το επίπεδο φορτίου 120-150 kN παρουσιάζει μερική αποκόλληση και σε υψηλότερα φορτία των 150 kN το πλαίσιο παρουσιάζει συνεχώς μεγαλύτερες γωνιακές παραμορφώσεις από το τοίχωμα και φαίνεται ότι πρακτικά αποκολλάται απ' αυτό. Στο μέγιστο φορτίο το πλαίσιο έχει τιμή διατμητικής παραμόρφωσης περίπου 3‰ ενώ το τοίχωμα περίπου 1.4‰.

Στα Σχ. 3.45 έως 3.47 γίνεται σύγκριση των διατμητικών παραμορφώσεων πλαισίου και τοιχώματος σε συνάρτηση με τη μέση οριζόντια σχετική μετακίνηση του δοκιμίου, $d_m(\%)$, η οποία στο μέγιστο φορτίο είναι $d_{pmax}^m=0.36\%$.

Στο διάγραμμα του Σχ. 3.45 (μέση τιμή διατμητικής παραμόρφωσης, γ_m , συναρτήσει της επιβαλλόμενης σχετικής οριζόντιας μετακίνησης, d_m), φαίνεται ότι η διαφοροποίηση της διατμητικής παραμόρφωσης πλαισίου και σκυροδέματος ξεκινά σε τιμή της μέσης σχετικής μετακίνησης περίπου $d_m=0.02\%$ και μέσης διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma_m = 0.1 \text{ ‰}$. Η διατμητική παραμόρφωση του τοιχώματος αυξάνει μέχρι τη σχετική μετακίνηση περίπου $d_m=0,64\%$, μετά μειώνεται και τελικά σταθεροποιείται στη τιμή περίπου $\gamma_m=1.6 \text{ ‰}$, σε αντίθεση με το πλαίσιο του οποίου η διατμητική παραμόρφωση αυξάνει συνεχώς γιατί σιγά-σιγά αποκολλάται από το τοίχωμα.

3.5. Σχετικές Μετακινήσεις Τοιχώματος με Περιβάλλον Πλαίσιο και Βάση Δοκιμίου

Στα Σχ. 3.48, 3.49 περιλαμβάνονται τα διαγράμματα οριζόντιου φορτίου - σχετικής αποκόλλησης τοιχώματος από το πλαίσιο και τη βάση αγκύρωσης και οριζόντιου φορτίου - σχετικής ολίσθησης στις διεπιφάνειες τοιχώματος-πλαισίου και τοιχώματος-βάσης συναρτήσει της επιβαλλόμενης οριζόντιας μετακίνησης στον 1^ο κύκλο φόρτισης. Τα διαγράμματα

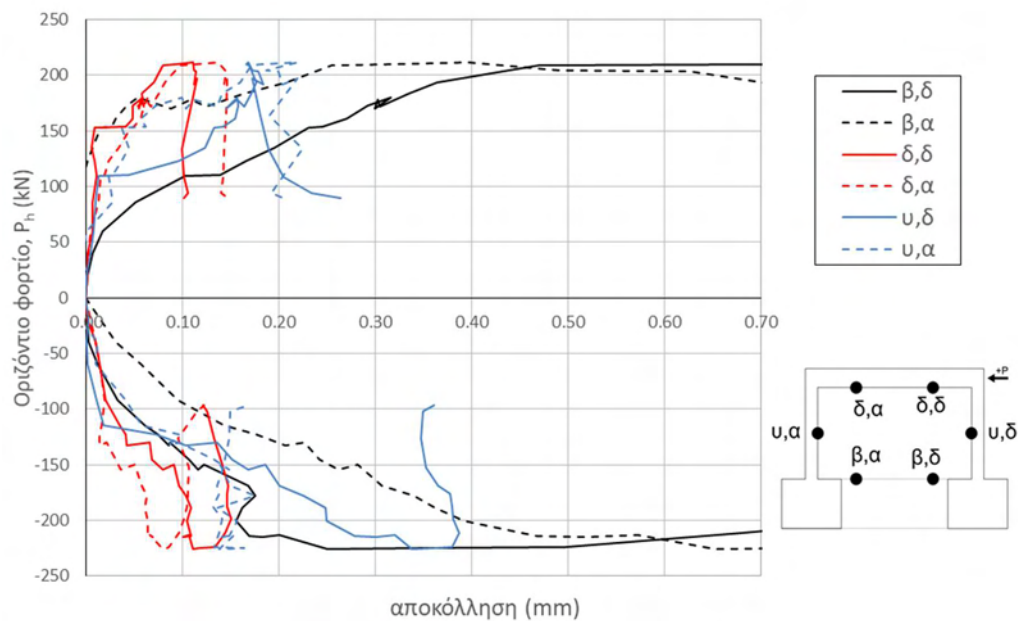
εξάγονται με βάσει τις μετρήσεις που έχουν περιγραφεί στο κεφ. 2.4.1. Στα υπομνήματα χρησιμοποιούνται οι εξής ενδείξεις:

«β,α» και «β,δ» : αριστερή και δεξιά θέση μέτρησης στη βάση, αντίστοιχα

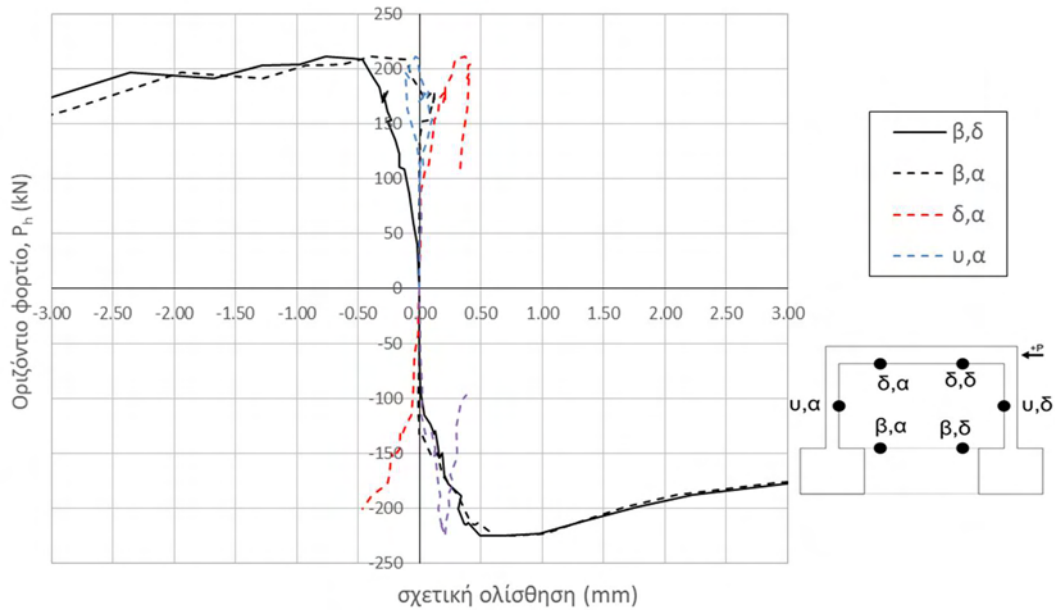
«δ,α» και «δ,δ»: αριστερή και δεξιά θέση μέτρησης στη δοκό, αντίστοιχα

«υ,α» και «υ,δ»: θέση μέτρησης στο αριστερό και δεξιό υποστύλωμα, αντίστοιχα

Τονίζεται ότι «θετική» ολίσθηση ορίζεται η ολίσθηση του τοιχώματος προς τα δεξιά σε σχέση με τη βάση ή σε σχέση με τη δοκό και επίσης η ολίσθηση του τοιχώματος προς τα πάνω σε σχέση με το αριστερό υποστύλωμα (όψη αναφοράς είναι η εμπρόσθια όψη του δοκιμίου).



Σχήμα 3.48 – Διαγράμματα οριζόντιου φορτίου-αποκόλλησης τοιχώματος από περιβάλλον πλαίσιο στον 1^ο κύκλο φόρτισης για δοκίμιο Α8.



Σχήμα 3.49 – Διαγράμματα οριζόντιου φορτίου-σχετικής ολίσθησης τοιχώματος με περιβάλλον πλαίσιο στον 1^ο κύκλο φόρτισης για δοκίμιο A8.

Στον Πίν. 3.1 περιλαμβάνονται οι μετρήσεις της σχετικής ολίσθησης και αποκόλλησης του τοιχώματος στο μέγιστο φορτίο, ενώ στον Πίν. 3.2 παρουσιάζονται επίσης οι μέσες τιμές των σχετικών μετακινήσεων του τοιχώματος σε κάθε διεπιφάνεια, λαμβάνοντας υπόψη και τη θετική και την αρνητική φόρτιση, σε διάφορα επίπεδα της επιβαλλόμενης οριζόντιας μετακίνησης.

Πίνακας 3.1 - Πειραματικές τιμές μέγιστου οριζοντίου φορτίου, $P_{h,max}$, αντίστοιχης οριζόντιας μετακίνησης, $\delta_{h,Pmax}$, και σχετικής ολίσθησης, s , και αποκόλλησης, w , τοιχώματος σε σχέση με πλαίσιο για δοκίμιο A8.

$P_{h,max}$ (kN)	$\delta_{h,max}$ (mm)	δ_h/h (%)	Βάση αγκύρωσης				Δοκός πλαισίου			Υποστυλώματα		
			$w_{\beta,\delta}^{(1)}$ (mm)	$s_{\beta,\delta}^{(1)}$ (mm)	$s_{\beta,\alpha}^{(1)}$ (mm)	$w_{\beta,\alpha}^{(1)}$ (mm)	$w_{\delta,\delta}^{(2)}$ (mm)	$w_{\delta,\alpha}^{(2)}$ (mm)	$s_{\delta,\alpha}^{(2)}$ (mm)	$w_{\nu,\delta}^{(3)}$ (mm)	$w_{\nu,\alpha}^{(3)}$ (mm)	$s_{\nu,\alpha}^{(3)}$ (mm)
-231,03	-2,97	0,36	0,35	0,70	0,74	0,74	0,12	0,08	-0,40	0,37	0,17	0,20

Σημειώσεις

- (1) $w_{\beta,\alpha}$, $s_{\beta,\delta}$ =αποκόλληση και σχετική ολίσθηση τοιχώματος-βάσης στην αριστερή και δεξιά μετρητική θέση, αντίστοιχα
(2) $w_{\delta,\alpha}$, $s_{\delta,\delta}$ =αποκόλληση και σχετική ολίσθηση τοιχώματος-δοκού στην αριστερή και δεξιά μετρητική θέση, αντίστοιχα
(3) $w_{\nu,\alpha}$, $s_{\nu,\delta}$ =αποκόλληση και σχετική ολίσθηση τοιχώματος με αριστερό και δεξιό υποστυλώμα, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.2 - Πειραματικές μέσες τιμές σχετικής ολίσθησης, s , και αποκόλλησης, w , τοιχώματος σε σχέση με πλαίσιο για διάφορα επίπεδα φόρτισης για δοκίμιο A8 (λαμβάνονται υπόψη και η αριστερή και η δεξιά μέτρηση στις διεπιφάνειες).

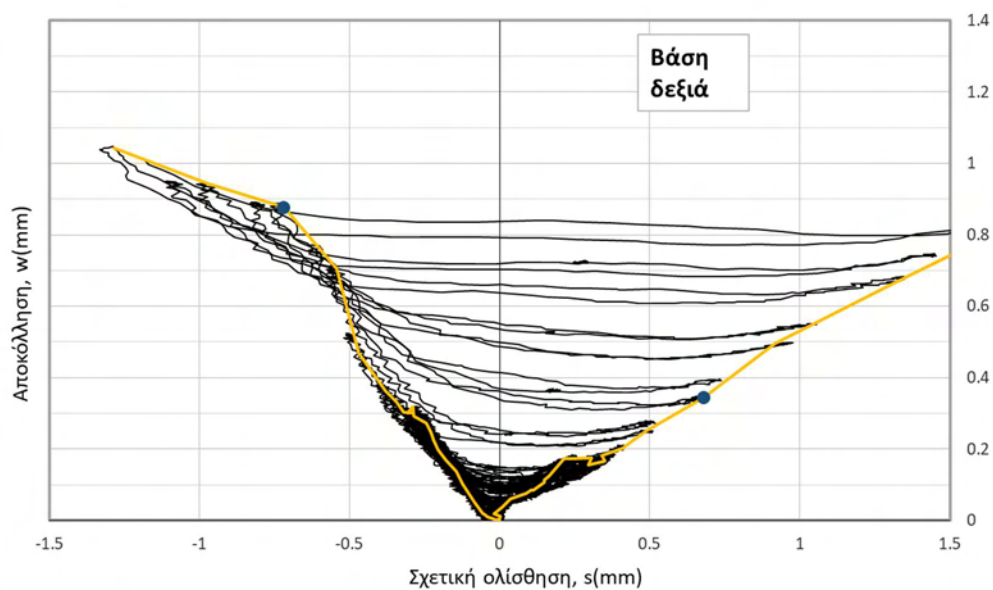
P_h^m (kN)	δ_h^m (mm)	δ_h/h (%)	Βάση αγκύρωσης		Δοκός πλαισίου		Υποστρώματα	
			w_p^m (mm)	s_p^m (mm)	w_δ^m (mm)	s_δ^m (mm)	w_v^m (mm)	s_v^m (mm)
116.87 ^(αν)	0.60	0.07	0.10	0.06	0.02	0.09	0.06	0.03
179.02 ^(αν)	1.65	0.20	0.22	0.21	0.07	0.24	0.16	0.11
203.75 ^(αν)	2.40	0.29	0.34	0.33	0.08	0.32	0.20	0.09
217.55 ^(αν)	3.38	0.41	0.66	0.79	0.12	0.40	0.23	0.12
166.57 ^(φθ)	6.00	0.73	0.90	3.44	0.13	0.45	0.22	0.18

Σημειώσεις

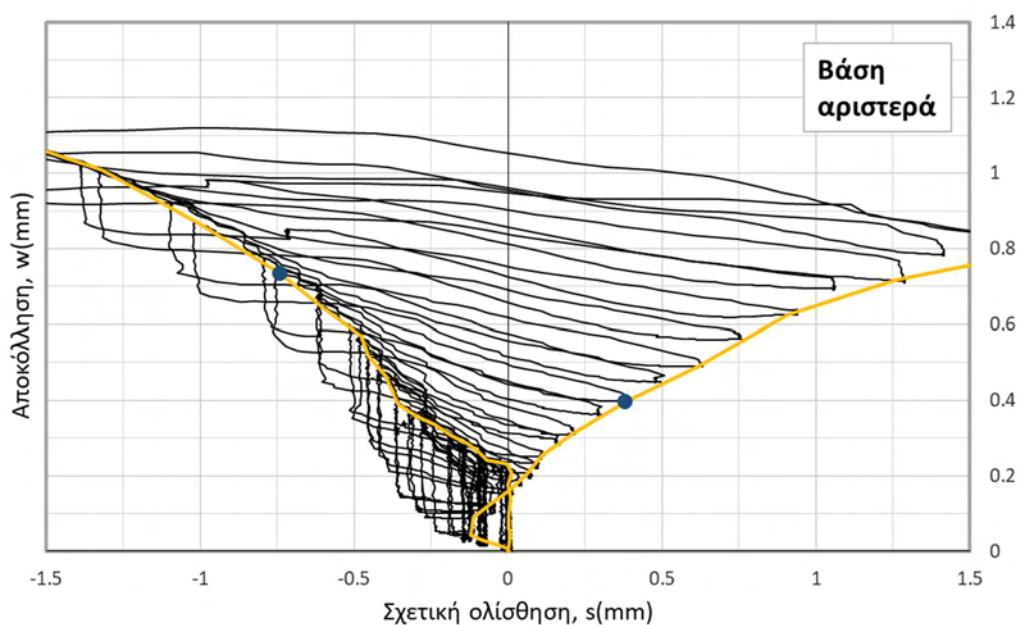
- (1) (αν) = ανιών κλάδος απόκρισης
(2) (φθ) = φθίνων κλάδος απόκρισης

Τελικά, στα Σχ. 3.50 έως 3.54 παρουσιάζονται διαγράμματα αποκόλλησης – σχετικής ολίσθησης στις θέσεις των διεπιφανειών, όπου έχει τοποθετηθεί ζεύγος DCDT (για μέτρηση αποκόλλησης και ολίσθησης). Στα Σχ. 3.53 και 3.54 συμπεριλαμβάνεται μια θεωρητική καμπύλη (Σχέση 3.6) με βάση αναλυτικό μοντέλο εκτίμησης της σχέσης αποκόλλησης (w) - ολίσθησης (s) για διεπιφάνειες σκυροδέματος-σκυροδέματος με εγκάρσιο οπλισμό, που προτάθηκε από τον Rasmussen (1962):

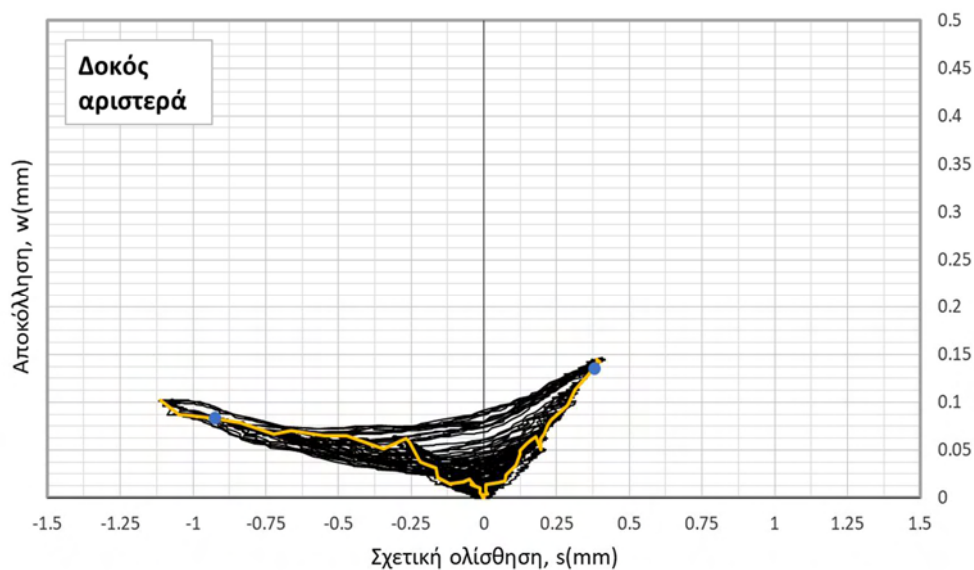
$$w = 0.60s^{2/3} \quad (3.6)$$



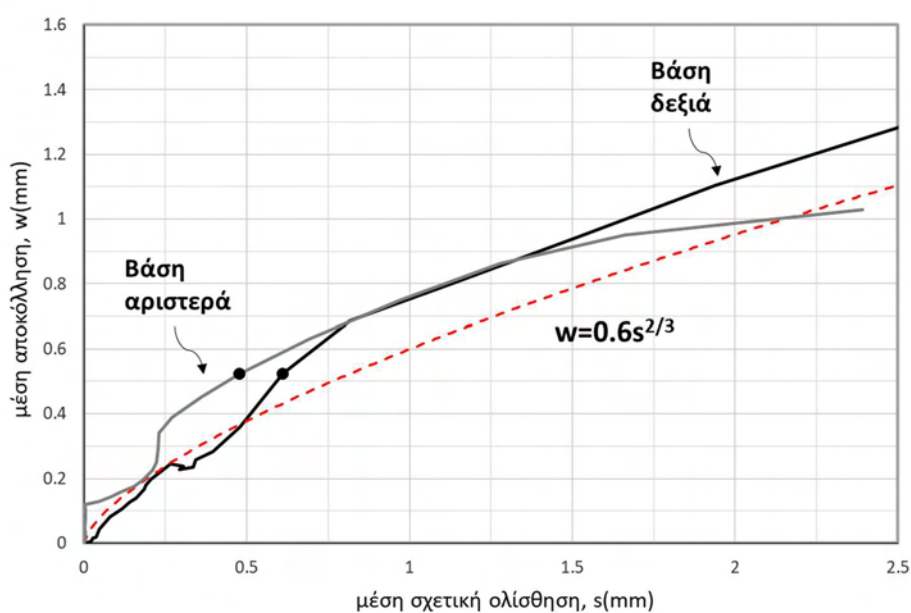
Σχήμα 3.50 - Διάγραμμα αποκόλλησης – σχετικής ολίσθησης στη δεξιά μετρητική θέση της βάσης (με κίτρινο η περιβάλλουσα για 1^ο κύκλο φόρτισης).



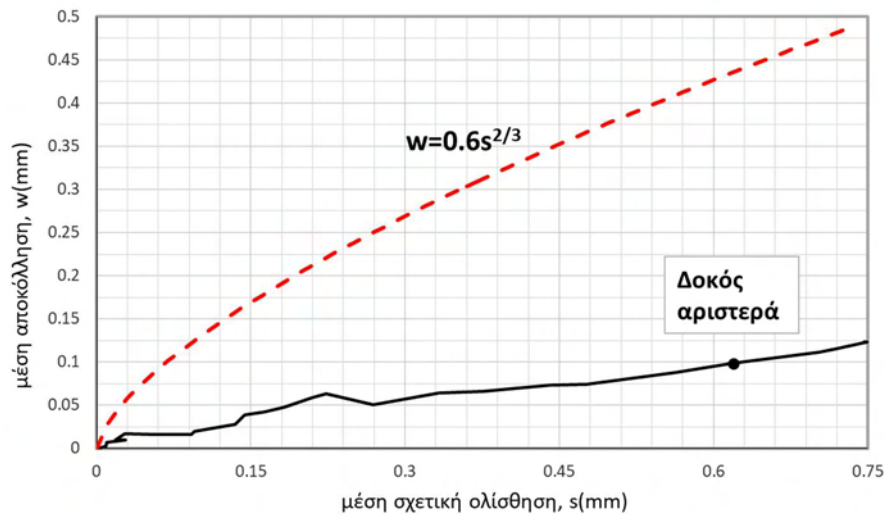
Σχήμα 3.51 - Διάγραμμα αποκόλλησης – σχετικής ολίσθησης στην αριστερή μετρητική θέση της βάσης (με κίτρινο η περιβάλλουσα για 1^ο κύκλο φόρτισης).



Σχήμα 3.52 - Διάγραμμα αποκόλλησης – σχετικής ολίσθησης στην αριστερή μετρητική θέση της δοκού (με κίτρινο είναι η περιβάλλουσα για 1^ο κύκλο φόρτισης).



Σχήμα 3.53 - Διάγραμμα μέσης αποκόλλησης - μέσης σχετικής ολίσθησης 1^{ου} κύκλου φόρτισης στις δύο μετρητικές θέσεις της βάσης.



Σχήμα 3.54 - Διάγραμμα μέσης αποκόλλησης - μέσης σχετικής ολίσθησης 1^{ου} κύκλου φόρτισης στην αριστερή μετρητική θέση δοκού.

1. Θετική φόρτιση:

Αποκόλληση τοιχώματος-πλαισίου:

Για τους 1^{ους} κύκλους φόρτισης, η αποκόλληση του τοιχώματος από τη βάση αγκύρωσης στη δεξιά θέση είναι πρακτικά μηδενική μέχρι το φορτίο 60 kN ($\approx 0,28P_{h,max}$), ενώ η αποκόλληση αριστερά είναι μηδενική μέχρι το φορτίο 150 kN ($\approx 0,70P_{h,max}$). Δηλαδή, παρατηρείται έναρξη αποκόλλησης του τοιχώματος από τη βάση αγκύρωσης στη δεξιά μετρητική θέση περίπου στο φορτίο 60 kN. Η αποκόλληση του τοιχώματος από τη βάση στη δεξιά μετρητική θέση είναι πάντα μεγαλύτερη από αυτή στην αριστερή, κάτι το οποίο είναι σύμφωνο με τη διεύθυνση της θετικής φόρτισης και υποδεικνύει στροφή του τοιχώματος στο επίπεδό του (σχετική κάμψη). Η αποκόλληση στη δεξιά θέση είναι περίπου διπλάσια αυτής στην αριστερή για τιμή φορτίου μεγαλύτερη από περίπου 170 kN ($\approx 0,80P_{h,max}$). Στο μέγιστο φορτίο η αποκόλληση έχει τιμή 0.40 mm και 0.88 mm αριστερά και δεξιά, αντίστοιχα. Στον φθίνοντα κλάδο απόκρισης οι αποκολλήσεις αυτές αυξάνονται ραγδαία.

Η αποκόλληση του τοιχώματος από τη δοκό του πλαισίου στη δεξιά θέση πρακτικά είναι ίδια με αυτήν στην αριστερή θέση (με ελάχιστα μικρότερη τιμή). Στο μέγιστο φορτίο η αποκόλληση αριστερά έχει τιμή 0,14 mm, δηλαδή περίπου το ένα τρίτο (1/3) της μικρότερης τιμής αποκόλλησης στη βάση αγκύρωσης. Αυτή η διαφορά της αποκόλλησης του

τοιχώματος από τη δοκό και τη βάση είναι εμφανής και στην εικόνα αστοχίας του δοκιμίου (Σχ. 3.9). Μετά το μέγιστο φορτίο οι αποκόλλήσεις αυτές σταθεροποιούνται.

Η τιμή αποκόλλησης του τοιχώματος από τα δύο υποστυλώματα σε σχέση με το φορτίο μεταβάλλεται με παρόμοιο τρόπο, με τη διαφορά ότι η αποκόλληση από το δεξιό υποστύλωμα παρουσιάζει μια απότομη αύξηση σε φορτίο 110 kN, ενώ από το αριστερό παρατηρείται σημαντική αύξηση σε φορτίο 170 kN. Στο μέγιστο φορτίο η αποκόλληση από το αριστερό υποστύλωμα είναι 0.20 mm ενώ από το δεξιό 0.17 mm.

Σχετική ολίσθηση τοιχώματος-πλαισίου:

Όσον αφορά την σχετική ολίσθηση στον 1^ο κύκλο της θετικής φόρτισης, παρατηρείται διαφορά στη σχετική ολίσθηση του τοιχώματος με τη βάση στις δύο μετρητικές θέσεις ήδη από το φορτίο περίπου 40 kN. Αριστερά παρατηρείται ολίσθηση τοιχώματος που δεν υπερβαίνει τα 0,12 mm μέχρι το φορτίο 180 kN, και κατόπιν παρατηρείται αυξανόμενη σχετική ολίσθηση προς τη κατεύθυνση του φορτίου. Η σχετική ολίσθηση στη δεξιά θέση της διεπιφάνειας τοιχώματος-βάσης είναι πάντα μεγαλύτερη (κατ' απόλυτη τιμή) απ' ότι στην αριστερή θέση. Στο μέγιστο φορτίο η ολίσθηση αριστερά έχει τιμή -0.38 mm ενώ δεξιά - 0.70 mm. Μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου οι ολισθήσεις αυτές αυξάνονται ραγδαία.

Η σχετική ολίσθηση του τοιχώματος σε σχέση με τη δοκό πραγματοποιείται πάντα προς την αντίθετη κατεύθυνση αυτής του φορτίου. Μέχρι το φορτίο 100 kN, η τιμή της ολίσθησης είναι πρακτικά μηδενική. Στο μέγιστο φορτίο η ολίσθηση έχει τιμή 0.38 mm, ενώ μετά μειώνεται σταδιακά με αργό ρυθμό.

Η ολίσθηση του τοιχώματος σε σχέση με το αριστερό υποστύλωμα έχει πρακτικά μηδενική τιμή μέχρι το φορτίο 135 kN ($\approx 0,63P_{h,max}$), κατόπιν έχει θετικό πρόσημο και στο μέγιστο φορτίο αλλάζει πρόσημο έχοντας τιμή -0,06 mm. Γενικά η ολίσθηση αυτή δεν ξεπερνάει σε απόλυτη τιμή τα 0,11 mm.

2. Αρνητική φόρτιση:

Αποκόλληση τοιχώματος-πλαισίου:

Για τους 1^{ους} κύκλους της αρνητικής φόρτισης, η αποκόλληση του τοιχώματος και στις δύο μετρητικές θέσεις της βάσης ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά όπως και στην θετική φόρτιση με τη διαφορά ότι τώρα η αποκόλληση στη αριστερή θέση της βάσης είναι πάντα

μεγαλύτερη από αυτή στην δεξιά. Στο μέγιστο φορτίο η αποκόλληση αριστερά έχει τιμή 0.74 mm ενώ δεξιά 0.35 mm.

Ομοίως, οι δύο αποκολλήσεις του τοιχώματος από τη δοκό του πλαισίου ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά όπως στους θετικούς 1^{ους} κύκλους με τη διαφορά ότι τώρα η αποκόλληση στη δεξιά θέση της δοκού είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από αυτήν στην αριστερή. Στο μέγιστο φορτίο η αποκόλληση δεξιά έχει τιμή 0,12 mm, δηλαδή το ένα τρίτο της μικρότερης τιμής αποκόλλησης του τοιχώματος από τη βάση. Παρατηρούνται και εδώ πολύ μεγαλύτερες τιμές αποκολλήσεων σε σχέση με αυτές στη δοκό.

Οι τιμές των αποκολλήσεων του τοιχώματος από τα δύο υποστυλώματα ακολουθούν περίπου την ίδια πορεία σε σχέση με το φορτίο μέχρι το φορτίο -150 kN. Η αποκόλληση είναι πρακτικά μηδενική μέχρι το φορτίο -115 kN ($\approx 0.5P_{h,max}$), ενώ μετά αυξάνεται με πιο ταχύ ρυθμό. Η αποκόλληση από το δεξιό υποστύλωμα φτάνει με σταθερό ρυθμό την τιμή 0,36 mm στο μέγιστο φορτίο, όπου και σταθεροποιείται, ενώ η αποκόλληση από το αριστερό υποστύλωμα φτάνει την τιμή 0,16 mm σε φορτίο -150 kN, μετά από το οποίο πρακτικά σταθεροποιείται.

Σχετική ολίσθηση τοιχώματος-πλαισίου:

Όσον αφορά τις ολισθήσεις στον 1^ο κύκλο της αρνητικής φόρτισης η σχετική ολίσθηση του τοιχώματος στις δύο θέσεις στη βάση αγκύρωσης έχει πρακτικά ίδια τιμή σε όλη τη πορεία της φόρτισης. Μέχρι το φορτίο -123 kN ($\approx 0,53P_{h,max}$), η τιμή των ολισθήσεων αυτών είναι πρακτικά μηδενική. Στο μέγιστο φορτίο η ολίσθηση αριστερά έχει τιμή 0.74 mm ενώ δεξιά 0.70 mm. Μετά το μέγιστο φορτίο οι ολισθήσεις αυτές αυξάνονται ραγδαία.

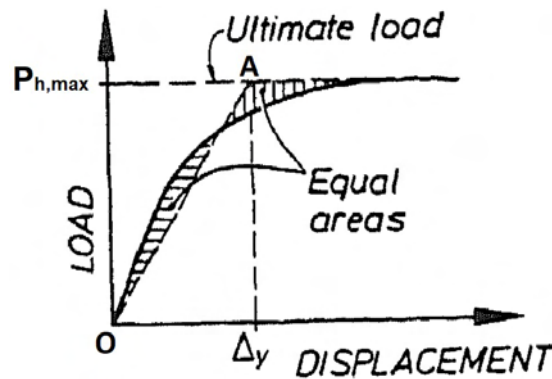
Το τοίχωμα ολισθαίνει συνεχώς προς τα αριστερά σε σχέση με τη δοκό. Μέχρι το φορτίο -100 kN ($\approx 0,43P_{h,max}$), η τιμή της ολίσθησης είναι πρακτικά μηδενική. Στο μέγιστο φορτίο η ολίσθηση έχει τιμή -0.42 mm, ενώ κατόπιν ελαττώνεται σταδιακά.

Η ολίσθηση του τοιχώματος σε σχέση με το αριστερό υποστύλωμα είναι πρακτικά μηδενική μέχρι το φορτίο -130 kN ($\approx 0,56P_{h,max}$), οπότε το τοίχωμα αρχίζει να ολισθαίνει προς τα πάνω σε σχέση με το υποστύλωμα. Στο μέγιστο φορτίο η ολίσθηση έχει τιμή 0,20 mm, ενώ μετά αυξάνεται με αργό ρυθμό.

3.6. Πλαστιμότητα

Υπολογίστηκε μια μέση τιμή δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων, μ_{δ}^m , με βάση τις ονομαστικές τιμές οριζόντιας μετακίνησης στη συμβατική «διαρροή», δ_y , και στη συμβατική «αστοχία», δ_u , για τη θετική και αρνητική φόρτιση (βλ. Σχ. 3.56).

Ακολουθείται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε και σε προηγούμενα δοκίμια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος (Park, 1988). Συγκεκριμένα, η ονομαστική οριζόντια μετακίνηση «διαρροής», δ_y , ορίζεται συμβατικά μέσω της ευθείας OA (Σχ. 3.55) έτσι ώστε τα εμβαδά εκατέρωθεν της περιβάλλουσας P-δ του 1^{ου} κύκλου φόρτισης (θετικής ή αρνητικής) να είναι ίσα. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο μοντέλο ισοδύναμης ελαστοπλαστικής απορρόφησης ενέργειας. Για τον προσδιορισμό της δ_y λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη τιμή του φορτίου $P_{h,max}$.



Σχήμα 3.55 – Σχηματική απεικόνιση ορισμού συμβατικής μετακίνησης «διαρροής», δ_y , με βάση το μοντέλου ισοδύναμης ελαστοπλαστικής απορρόφησης ενέργειας (Park, 1988).

Η μετακίνηση στη συμβατική «αστοχία», δ_u , προσδιορίζεται λαμβάνοντας τη μετακίνηση που αντιστοιχεί σε πτώση απόκρισης 15% (ως προς την μέγιστη τιμή φορτίου για την κάθε διεύθυνση φόρτισης) κατά τον 2^ο κύκλο φόρτισης (Σχ. 3.56).

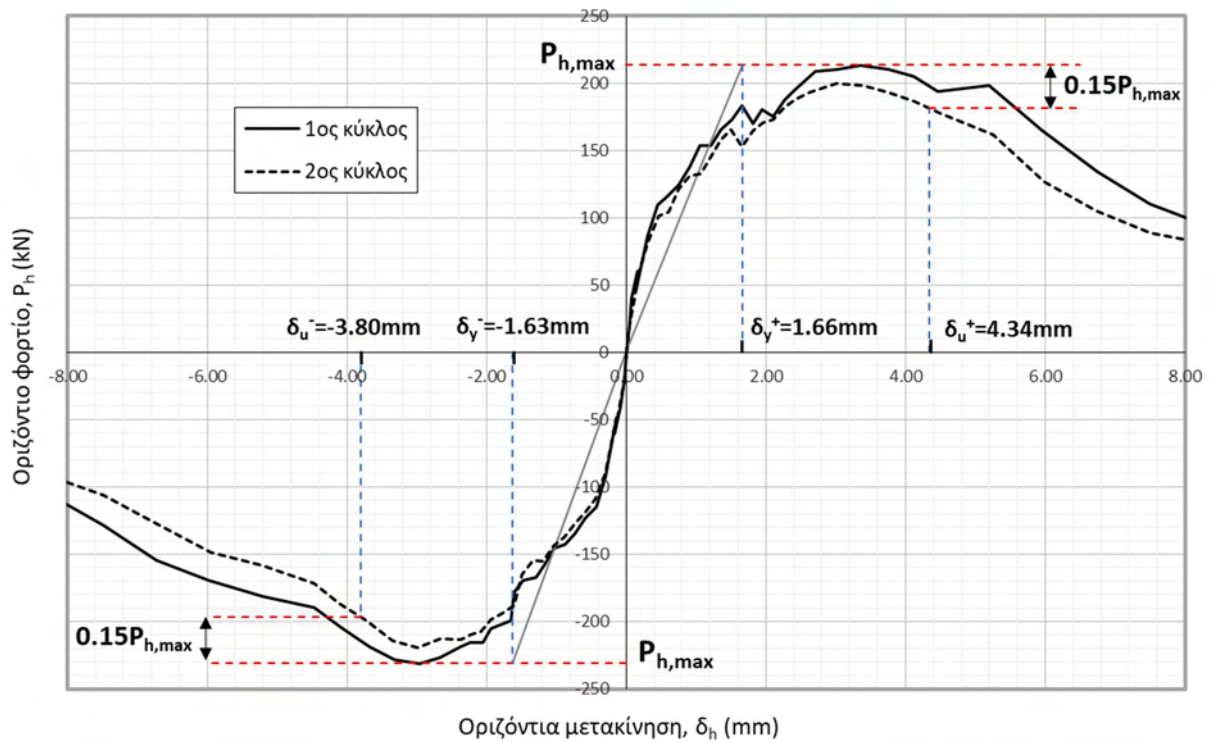
Υπολογίζονται διαφορετικές τιμές δείκτη πλαστιμότητας για την θετική και αρνητική φορά φόρτισης, ως εξής:

$$\mu_{\delta}^{+} = \frac{\delta_u^{+}}{\delta_y^{+}} \quad \text{και} \quad \mu_{\delta}^{-} = \frac{\delta_u^{-}}{\delta_y^{-}} \quad (3.7)$$

όπου:

$\delta_u^+ = \delta(0,85 P_{\max}^+)$ είναι η μετακίνηση μετά την επίτευξη της φέρουσας ικανότητας σε φορτίο $P=0,85 P_{\max}^+$ και $\delta_u^- = \delta(0,85 P_{\max}^-)$ η μετακίνηση σε φορτίο $P=0,85 P_{\max}^-$ στην περιβάλλουσα του 2^{ου} θετικού και αρνητικού κύκλου φόρτισης, αντίστοιχα (Περδικάρης κ.ά., 2012).

Στο Σχ. 3.56 που περιλαμβάνει την περιβάλλουσα P-δ για τον 1^ο και 2^ο κύκλο της θετικής και αρνητικής φόρτισης, ορίζονται οι συμβατικές τιμές της μετακίνησης δ_y , και δ_u .



Σχήμα 3.56 – Διάγραμμα P-δ θετικής και αρνητικής φόρτισης, για υπολογισμό δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων, μ .

Οι τιμές της συμβατικής οριζόντιας μετακίνησης διαρροής, δ_y και αστοχίας, δ_u και του δείκτη πλαστιμότητας, μ , για τους θετικούς και τους αρνητικούς κύκλους φόρτισης, καθώς και οι μέσες τιμές περιλαμβάνονται στον Πίν. 3.3.

Πίνακας 3.3 – Υπολογισθείσες τιμές δ_y , δ_u και μ δοκιμίου A8.

	$0,85P_{h,\max}$ (kN)	δ_y (mm)	δ_u (για 2 ^ο κύκλο) (mm)	μ
Φόρτιση (+)	181.35	1.66	4.34	2.62
Φόρτιση (-)	196.38	1.63	3.80	2.34

Μέση τιμή	188.86	1.64	4.07	2.48
------------------	--------	------	------	------

Στο Κεφ. 6 γίνεται σύγκριση του δείκτη πλαστιμότητας του δοκιμίου A8 με τον αντίστοιχο δείκτη πλαστιμότητας προηγούμενων δοκιμίων A4, A6 και A7, που εξετάστηκαν στην αρχική φάση του ερευνητικού προγράμματος.

3.7. Δυσκαμψία/Δυστημήςια

Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις στον 1^ο κύκλο φόρτισης στη θετική κατεύθυνση (προηγείται της αρνητικής), προσδιορίστηκε η αρχική δυσκαμψία/δυστημήςια του δοκιμίου A8, K_o . Ο προσδιορισμός του K_o έγινε με βάση γραμμική προσαρμογή των μετρήσεων στο διάγραμμα $P_h - \delta_h$ σε επίπεδο φορτίου +5 kN έως +33 kN στον 1^ο θετικό ημικύκλο φόρτισης ± 40 kN.

Επίσης, υπολογίστηκε η μέση επιβατική δυσκαμψία στη «διαρροή» και στο μέγιστο φορτίο, K_y^m και $K_{P_{max}}^m$, αντίστοιχα. Η συμβατική δυσκαμψία «διαρροής», K_y , ορίζεται ως:

$$K_y^+ = \frac{P_{max}^+}{\delta_y^+} \quad \text{και} \quad K_y^- = \frac{P_{max}^-}{\delta_y^-} \quad (3.8)$$

όπου P_{max}^+ και P_{max}^- είναι η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου στη θετική και αρνητική φόρτιση, αντίστοιχα (στον 1ο κύκλο φόρτισης). Ομοίως η επιβατική δυσκαμψία στο μέγιστο φορτίο, $K_{P_{max}}$, υπολογίζεται από τη σχέση (3.9):

$$K_{P_{max}}^+ = \frac{P_{max}^+}{\delta_{P_{max}}^+} \quad \text{και} \quad K_{P_{max}}^- = \frac{P_{max}^-}{\delta_{P_{max}}^-} \quad (3.9)$$

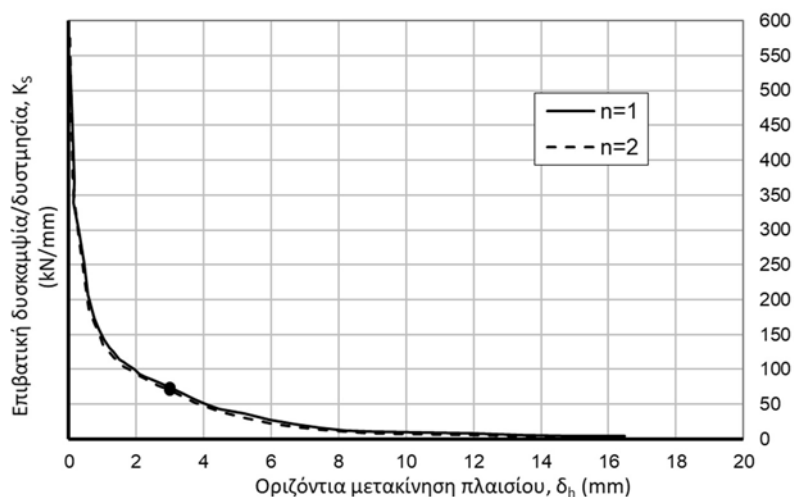
Οι υπολογισθείσες τιμές δίνονται στον Πίν. 3.4.

Πίνακας 3.4 – Πειραματικές τιμές δυσκαμψίας/δυστημήςιας, K_{in} , K_y και $K_{P_{max}}$ δοκιμίου A8.

	K_o (kN/mm)	K_y (kN/mm)	$K_{P_{max}}$ (kN/mm)
Φόρτιση (+)	730	128.7	63.6
Φόρτιση (-)	-	142	78

Μέση τιμή	-	135.3	70.8
-----------	---	-------	------

Στο Σχ. 3.57 παρουσιάζεται η μέση επιβατική δυσκαμψία του δοκιμίου A8 σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση, δ_h , για το 1^ο και 2^ο κύκλο φόρτισης ($n=1, 2$).



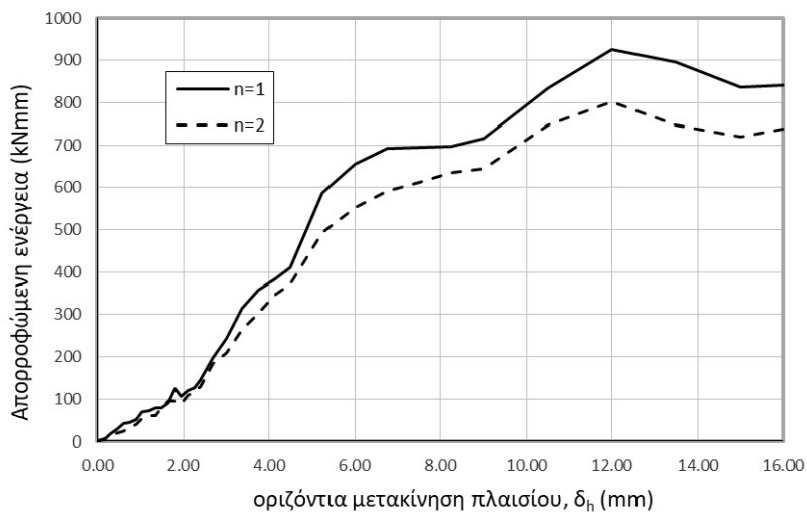
Σχήμα 3.57 – Διάγραμμα μέσης επιβατικής δυσκαμψίας του δοκιμίου A8 σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση, δ_h , για 1^ο και 2^ο κύκλο φόρτισης ($n=1, 2$).

Στο Κεφ. 5 γίνεται σύγκριση της τιμής της αρχικής δυσκαμψίας/δυσστημσίας, K_0 , του δοκιμίου A8 με τις θεωρητικές τιμές που προκύπτουν με βάση προτεινόμενες σχέσεις από διάφορους ερευνητές. Επίσης, στο Κεφ. 6 γίνεται σύγκριση της πειραματικής τιμής K_0 με αυτή των δοκιμίων A4, A6, A7, που εξετάστηκαν στην αρχική φάση του ερευνητικού προγράμματος.

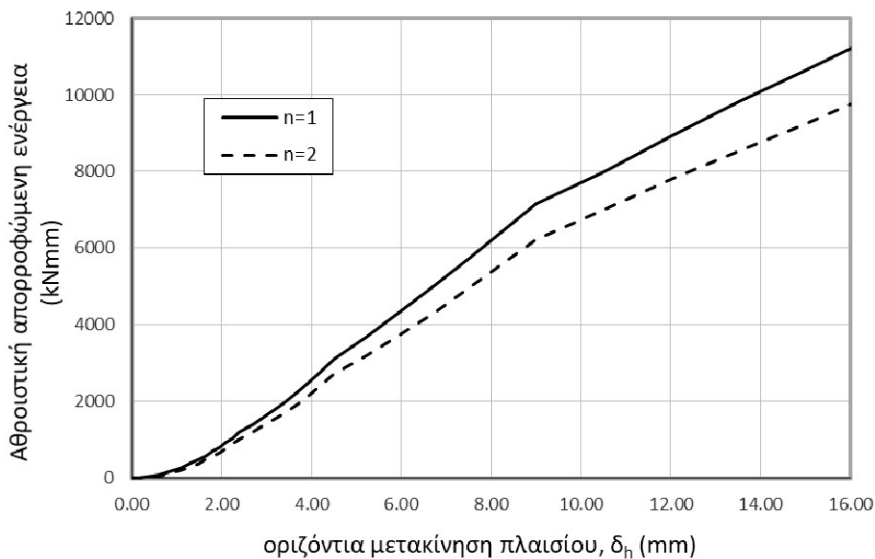
3.8. Απορρόφηση Ενέργειας

Στο Σχ. 3.58 παρουσιάζεται η ενέργεια που καταναλώνεται στο δοκίμιο A8 σε κάθε επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση συναρτήσει της μετακίνησης αυτής για τον 1^ο και 2^ο κύκλο φόρτισης ($n=1, 2$). Η ενέργεια σε κάθε επιβαλλόμενη μετακίνηση υπολογίστηκε ως το εμβαδό που περικλείεται από τον πλήρη βρόχο του διαγράμματος φορτίου-μετακίνησης για τον εκάστοτε κύκλο φόρτισης (ο βρόχος περιλαμβάνει και τη θετική και την αρνητική φόρτιση). Επίσης, στο Σχ. 3.59 παρουσιάζεται το διάγραμμα αθροιστικής απορρόφησης ενέργειας

συναρτήσει της επιβαλλόμενης οριζόντιας μετακίνησης για τον 1^ο και 2^ο κύκλο φόρτισης (n=1, 2).



Σχήμα 3.58 – Ενέργεια απορρόφησης δοκιμίου A8 σε κάθε επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση για 1^ο και 2^ο κύκλο φόρτισης.



Σχήμα 3.59 – Αθροιστική ενέργεια απορρόφησης δοκιμίου A8 στην εκάστοτε επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση για 1^ο και 2^ο κύκλο φόρτισης.

Στο Κεφ. 6 γίνεται σύγκριση της απορροφώμενης ενέργειας του δοκιμίου A8 με αυτή των δοκιμίων A4, A6, A7, που εξετάστηκαν στην αρχική φάση του ερευνητικού προγράμματος.

Κεφάλαιο 4^ο : ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1. Διαγράμματα Φορτίου-Μετακίνησης

Το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης του δοκιμίου A8 (Σχ. 3.1) καταδεικνύει μια διατμητική συμπεριφορά. Όσο αυξάνονται οι επιβαλλόμενες μετακινήσεις, οι βρόχοι τείνουν να έχουν όλο και μικρότερη κλίση στην αρχή του αύξοντα κλάδου ενώ οι κορυφές τους είναι συμπιεσμένες. Η φυσική ερμηνεία είναι ότι στην αρχή του εκάστοτε κύκλου εκδηλώνονται σημαντικές παραμορφώσεις (κυρίως οριζόντια μετακίνηση στη κρίσιμη διεπιφάνεια τοιχώματος-βάσης) με μικρή αντίσταση του φορέα, η οποία σταδιακά αυξάνεται (δηλαδή αυξάνεται η δυσκαμψία/δυστημσία). Αυτό το φαινόμενο είναι χαρακτηριστικό για φορείς που καταπονούνται κυρίως σε διάτμηση.

Το δοκίμιο A8 παρουσίασε σχετικά συμμετρική συμπεριφορά για τη θετική και αρνητική κατεύθυνση φόρτισης. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την διατμητική αστοχία που συμβαίνει (βλ. παρ. 3.2) στην κάτω διεπιφάνεια (τοιχώματος-βάσης), υποδηλώνει επαρκή αγκύρωση των διατμητικών συνδέσμων, διότι φαίνεται να είναι ικανοί να συγκρατήσουν σε κάποιο βαθμό τη σύνδεση τοιχώματος και βάσης ανεξάρτητα της κατεύθυνσης φόρτισης.

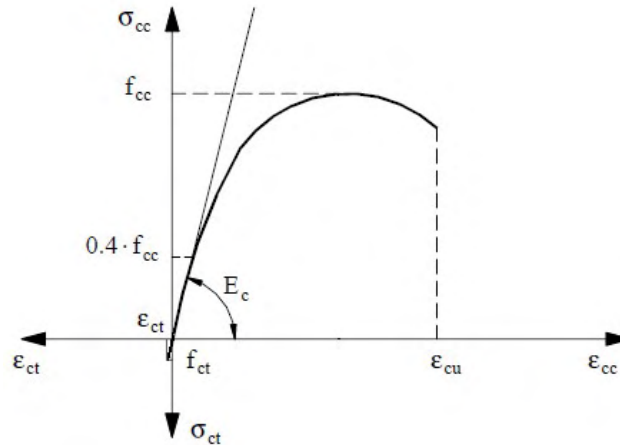
4.2. Ανηγμένες Παραμορφώσεις Σκυροδέματος Τοιχώματος

Αρχικά είναι σκόπιμη η εκτίμηση της κρίσιμης ανηγμένης παραμόρφωσης σκυροδέματος του τοιχώματος σε εφελκυσμό ή σε θλίψη, ώστε να γίνει η σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις του δοκιμίου A8. Με βάση τη γενική μορφή του διαγράμματος σ-ε μονοαξονικής έντασης θλίψης και εφελκυσμού για το σκυρόδεμα (βλ. Σχ. 4.1), θλιπτική αντοχή κυλίνδρου την ημέρα της δοκιμής για το σκυρόδεμα του τοιχώματος, $f_{cc} = 21.7 \text{ MPa}$, μέτρο ελαστικότητας με βάση τη σχέση (4.1) που προτείνει ο ΕΚΩΣ2000 για σκυρόδεμα σε κεντρική θλίψη ή εφελκυσμό

$$E_c = 9.50(f_{ck} + 8)^{1/3} = 29.09 \text{ GPa} \quad (4.1)$$

και θεωρώντας ότι η εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος είναι $f_{ct} \approx 0.1f_{cc}$, η κρίσιμη ανηγμένη παραμόρφωση σε εφελκυσμό (ρηγμάτωση) στο σκυρόδεμα του τοιχώματος εκτιμάται ως:

$$\varepsilon_{ct} = \frac{f_{ct}}{E_c} \cong \frac{0.1f_{cc}}{E_c} = \frac{0.1 \times 21.7 \text{ MPa}}{29.09 \times 10^3 \text{ MPa}} = 0.0075\%$$



Σχήμα 4.1 – Σχηματικό διάγραμμα σ-ε σκυροδέματος.

Όσο αφορά τη θλιπτική παραμόρφωση θραύσης (σύνθλιψης) σκυροδέματος, ϵ_{cu} , αυτή λαμβάνεται ίση με **-0.35%**.

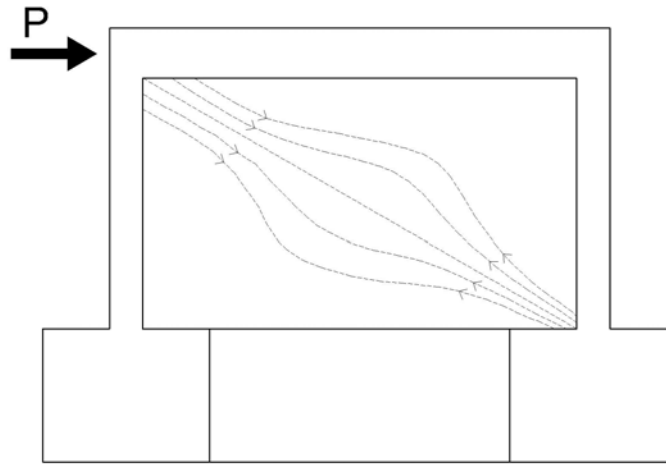
α) Θλιβόμενες διαγώνιοι:

Η μέγιστη κατ' απόλυτο τιμή ανηγμένη θλιπτική παραμόρφωση σκυροδέματος στο τοίχωμα (-2,5‰), που πλησίασε πιθανή τοπική σύνθλιψη σκυροδέματος, μετρήθηκε στην περιοχή της κάτω γωνίας της διαγωνίου L (θέση 9) στον κύκλο που επετεύχθη η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου.

Στο μέγιστο οριζόντιο φορτίο οι υπόλοιπες τιμές των sg's και των wg's ήταν εξαιρετικά χαμηλές για πιθανή θλιπτική αστοχία θλιπτήρα στο σκυρόδεμα του τοιχώματος. Επίσης, η μέγιστη τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης σκυροδέματος στο μέσο της διαγωνίου (sg3, sg4, sg5 και sg6) κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα από τις άλλες θέσεις (-0,20÷-0,50‰).

Οι μετρήσεις αυτές αποδεικνύουν ότι στο μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο δεν μπορεί να αναπτυχθεί διαγώνια θλιπτική δύναμη (θλιπτήρας) ικανή να προκαλέσει σύνθλιψη σκυροδέματος. Επίσης, παρατηρείται ότι οι αναπτυσσόμενες θλιπτικές παραμορφώσεις σκυροδέματος δεν είναι ομοιόμορφες κατά μήκος της διαγωνίου, αλλά είναι υψηλότερες κοντά στις γωνίες και χαμηλότερες ενδιάμεσα στη διαγώνιο. Μάλιστα, φαίνεται να είναι πιο μεγάλες στις κάτω γωνίες σε σχέση με τις πάνω, το οποίο πρέπει να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι κάτω κόμβοι των υποστυλωμάτων ευρίσκονται στην αμετακίνητη βάση του δοκιμίου. Άρα οι κάτω γωνίες του τοιχώματος είναι αμετακίνητες ενώ οι πάνω είναι περισσότερο ελεύθερες να μετατεθούν λόγω της παραμόρφωσης του πλαισίου. Στις κάτω γωνίες λοιπόν μπορούν να

αναπτυχθούν παραμορφώσεις άρα και τάσεις. Συνεπώς, η πιθανή μορφή της τροχιάς των θλιπτικών τάσεων μπορεί να αναπαρασταθεί με το σκαρίφημα του Σχ. 4.2.



Σχήμα 4.2 – Σχηματικό σκαρίφημα υποτιθέμενης τροχιάς θλιπτικών τάσεων κατά μήκος θλιβόμενης διαγωνίου του τοιχώματος δοκιμίου A8.

β) Εφελκόμενες διαγώνιοι:

Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις, η εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέσο της διαγωνίου (sg3, sg4, sg5 και sg6) κυμάνθηκε σε σχετικά χαμηλές τιμές, από 0,02‰ έως 0,09‰ μέχρι και το μέγιστο φορτίο.

Ωστόσο, στις υπόλοιπες θέσεις μετρήθηκαν τιμές που υπερβαίνουν κατά πολύ την κρίσιμη παραμόρφωση ρηγμάτωσης ($\approx 0,07\%$). Αυτό καταδεικνύει το σχηματισμό εφελκυστικών ρωγμών σε κάποιες θέσεις του τοιχώματος, όπως φαίνεται και από την εικόνα ρηγμάτωσης του δοκιμίου στο Σχ. 3.8 (βλ. παρ. 3.2). Βέβαια κάποιες μετρήσεις στην διαγώνιο L, όταν αυτή εφελκύεται (θετική φόρτιση), ξεπερνούν ακόμα και το 1‰ (sg9 και sg11) και μάλιστα σε φορτίο κοντά στο ήμισυ του μέγιστου φορτίου. Αυτό μπορεί πιθανότατα να αποδοθεί σε ανάπτυξη τοπικής διαγώνιας ρωγμής στη θέση των sg's.

Όπως φαίνεται και στα Σχ. 3.28-3.29, για τις εφελκόμενες διαγωνίους ισχύει παρόμοια τροχιά εφελκυστικών τάσεων με αυτή των θλιπτικών τάσεων για τις θλιβόμενες διαγωνίους, με υψηλότερες τάσεις κοντά στις γωνίες και χαμηλότερες στο μέσον. Επιπροσθέτως, και πάλι οι εφελκυστικές τάσεις στις κάτω γωνίες φαίνεται ότι είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές στις πάνω γωνίες.

4.3. Ανηγγμένες Παραμορφώσεις Οπλισμού

Ανάλυση διαγραμμάτων (Σχ. 3.31 έως 3.33)

Για τη θετική φόρτιση (1^{ος} κύκλος) παρατηρείται η αναμενόμενη θλίψη στη διαμήκη ράβδο με σχετικά μικρές τιμές ανηγμένης παραμόρφωσης (η μέγιστη τιμή είναι -0.12‰) και σίγουρα η ράβδος δεν διαρρέει (ανηγμένη παραμόρφωση διαρροής 1,75‰). Ομοίως, η διαγώνια ράβδος στον κόμβο του πλαισίου δεν διαρρέει για τη θετική φόρτιση και η θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωσή της δεν υπερβαίνει την τιμή -0,20‰.

Όσον αφορά την ανηγμένη παραμόρφωση στην διαμήκη ράβδο για την αρνητική φόρτιση (1^{ος} κύκλος), αυτή είναι εφελκυστική, όπως αναμένεται, αλλά και πάλι οι τιμές της είναι σχετικά μικρές (η μέγιστη τιμή είναι 0.23‰) και η ράβδος δεν διαρρέει μέχρι και την επίτευξη της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου. Η διαγώνια ράβδος δεν διαρρέει ούτε για την αρνητική φόρτιση με μέγιστη εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση 0,45‰.

Οι χαμηλές τιμές παραμόρφωσης στη διαμήκη ράβδο υποδηλώνουν ότι δεν υπάρχει σημαντική καμπτική συμπεριφορά στο υποστύλωμα. Η μετατόπιση γύρω στα +180 kN πιθανότατα αποδίδεται στη διατμητική αστοχία της κάτω διεπιφάνειας και στη βλάβη στη βάση του υποστυλώματος, που προκαλεί για θετικό φορτίο αύξηση πλέον εφελκυστικών παραμορφώσεων.

Οι χαμηλές τιμές παραμόρφωσης στη διαγώνια ράβδο του κόμβου είναι ένδειξη της χαμηλής έντασης κατά την διεύθυνση της διαγωνίου του κόμβου λόγω της ικανοποιητικής περίσφιγξης της περιοχής με συνδετήρες σε απόσταση 3 cm με αποτέλεσμα την απουσία κάποιας σημαντικής βλάβης στον κόμβο καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

4.4. Ανηγγμένες Παραμορφώσεις Διατμητικών Συνδέσμων

Ανάλυση διαγραμμάτων στα Σχ. 3.34 έως 3.40

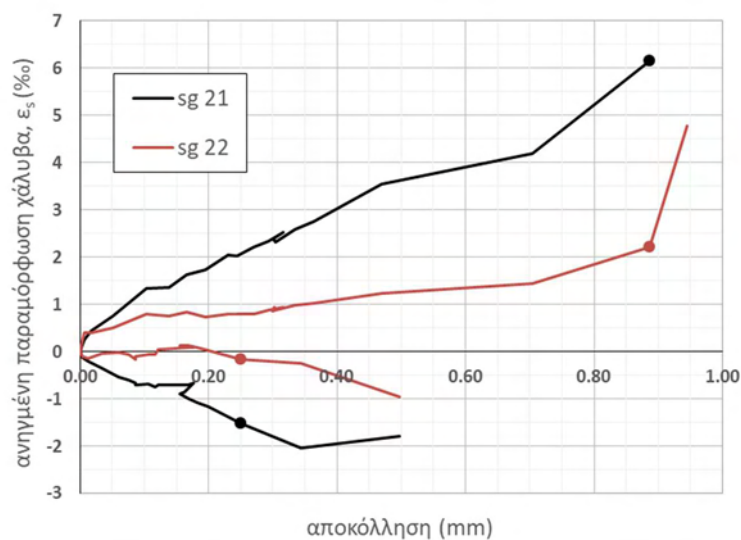
Παρά την γενικά αναξιόπιστη μεταβολή της ανηγμένης παραμόρφωσης των διατμητικών συνδέσμων στην περιοχή των διεπιφανειών στην άνω αριστερά γωνία του τοιχώματος, η παραμόρφωση αυτή δεν ξεπερνά κατ' απόλυτη τιμή το 2‰, που είναι σχετικά κοντά στο όριο διαρροής ($\epsilon_y = 2.35\%$).

Όσον αφορά τις ανηγμένες παραμορφώσεις για τη θετική φόρτιση (1^{ος} κύκλος), παρατηρείται εφελκυσμός στους συνδέσμους στην κάτω διεπιφάνεια, κάτι το οποίο είναι σύμφωνο με τις τιμές αποκόλλησης που επικρατούν στην περιοχή αυτή (βλ. παρ. 3.5). Η

ανηγμένη παραμόρφωση του sg21 έχει μεγαλύτερες τιμές από αυτήν του sg22 για φορτία υψηλότερα των 50 kN, κάτι που εκ πρώτης όψεως δεν είναι αναμενόμενο αν αναλογιστούμε ότι ο σύνδεσμος 22 είναι πιο κοντά στο αριστερό υποστύλωμα από τον 21. Ωστόσο αυτό μπορεί να οφείλεται σε κάποιο τοπικό φαινόμενο στη συνοριακή περιοχή των βλήτρων, λαμβάνοντας υπόψη ότι υπάρχουν δύο οριζόντια βλήτρα αγκυρωμένα κοντά στη βάση του δεξιού υποστυλώματος τα οποία διασταυρώνονται με τους κατακόρυφους συνδέσμους 23 και 22 και πιθανώς υποβοηθούν τα κατακόρυφα βλήτρα κοντά στη γωνία. Παρατηρείται ότι ο σύνδεσμος 21 διαρρέει λίγο πριν το κύκλο φόρτισης που επιτυγχάνεται η μέγιστη φέρουσα ικανότητα και ο σύνδεσμος 22 διαρρέει περίπου στον κύκλο αυτόν.

Όσον αφορά τις ανηγμένες παραμορφώσεις για την αρνητική φόρτιση (1^{ος} κύκλος), παρατηρείται πρακτικά μηδενική παραμόρφωση στο σύνδεσμο 22 μέχρι το μέγιστο φορτίο, ενώ το sg 21 δίνει τιμές θλιπτικής παραμόρφωσης, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο για την αρνητική φόρτιση καθώς η συγκεκριμένη περιοχή του τοιχώματος θλίβεται. Δεν παρατηρείται διαρροή κάποιου συνδέσμου.

Στο Σχ. 4.3 παρουσιάζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις χάλυβα των συνδέσμων 21 και 22 σε συνάρτηση με την αποκόλληση στη δεξιά θέση μέτρησης της βάσης (η οποία είναι σχετικά κοντά στα βλήτρα 21 και 22 και πιο αντιπροσωπευτική για το 21) για τον πρώτο κύκλο φόρτισης. Η αύξηση της ανηγμένης παραμόρφωσης περίπου αναλογικά με την αύξηση της αποκόλλησης, κάτι που παρατηρείται σε μεγαλύτερο βαθμό στο σύνδεσμο 21, υποδηλώνει ότι οι σύνδεσμοι είναι καλά αγκυρωμένοι και δεν πραγματοποιείται εξόλκευση.



Σχήμα 4.3 - Ανηγμένες παραμορφώσεις χάλυβα συνδέσμων 21 και 22 σε συνάρτηση με αποκόλληση στη δεξιά θέση μέτρησης της βάσης για 1^ο κύκλο φόρτισης (δοκίμιο A8).

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., η μέγιστη ικανότητα των διατμητικών συνδέσμων σε δράση βλήτρου επιστρατεύεται για τιμή μετακίνησης στη διεπιφάνεια ίση με $0.05d_b$, επομένως για τιμή σχετικής ολίσθησης στη διεπιφάνεια $0.1d_b$, λόγω της έμπηξης των συνδέσμων και από τις δύο πλευρές. Η απαιτούμενη τιμή ολίσθησης, λοιπόν, στην διεπιφάνεια για να φτάσουν τα βλήτρα στην αντοχή τους θεωρείται ότι είναι $0.1d_b = 0,60 \text{ mm}$. Στην παράγραφο 3.5 παρατηρήθηκε ότι στη δεξιά θέση της βάσης αγκύρωσης για θετική φόρτιση και στην αριστερή θέση της βάσης για αρνητική φόρτιση η τιμή της σχετικής ολίσθησης του τοιχώματος στο μέγιστο φορτίο είναι περίπου 0.60 mm .

Άρα, διαπιστώνεται ότι το δοκίμιο επιτυγχάνει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητά του μετά την επίτευξη της μέγιστης ικανότητας των διατμητικών συνδέσμων στην κάτω διεπιφάνεια (τοιχώματος-βάσης) σε δράση βλήτρου και επίσης μετά την διαρροή κάποιων εξ αυτών. Μετά τον κύκλο του μέγιστου φορτίου οι τιμές των αποκολλήσεων και ολισθήσεων στην κάτω διεπιφάνεια παρουσιάζουν ραγδαία αύξηση (βλ. παρ. 3.5)

4.5. Διατμητικές Παραμορφώσεις Τοιχώματος και Πλαισίου

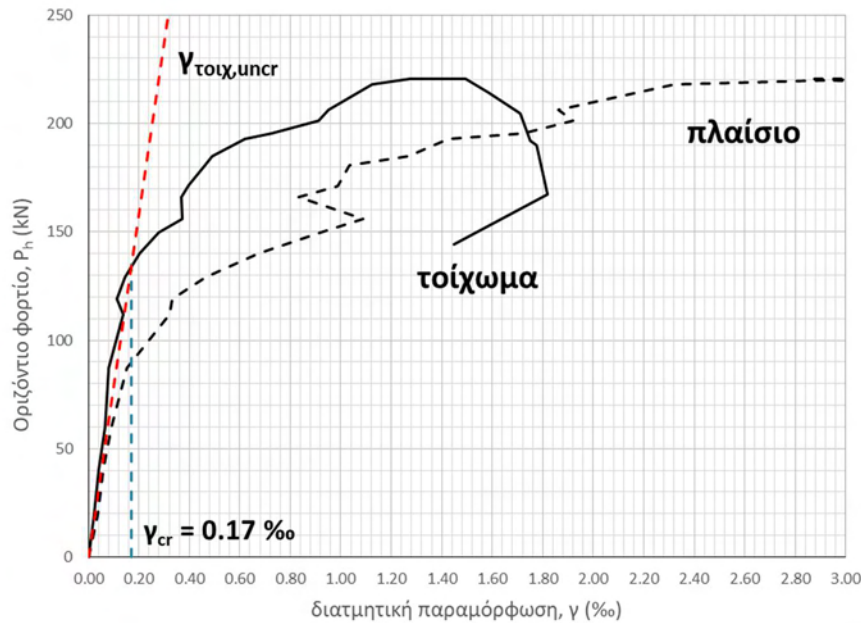
Ανάλυση διαγραμμάτων στα Σχ. 3.42 έως 3.47

Με βάση το Σχ. 3.42, στο επίπεδο φόρτισης των 150 kN είναι εμφανές ότι προκαλείται ρηγμάτωση του τοιχώματος (βλ. Κεφ. 4.2), και σε υψηλότερο φορτίο οι δύο παραμορφώσεις (εφελκυστική και θλιπτική) διαφοροποιούνται σημαντικά, με τη τιμή της θλιπτικής παραμόρφωσης να είναι κατά πολύ μικρότερη αυτής που αντιστοιχεί στην αστοχία του διαγώνιου θλιπτήρα σε σύνθλιψη.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να εκτιμηθεί η κρίσιμη διατμητική (γωνιακή) παραμόρφωση του τοιχώματος, $\gamma_{cr, \text{τοιχ}}$, για την οποία αναμένεται ρηγμάτωση του σκυροδέματος. Θεωρώντας ότι μέχρι αυτό το στάδιο η ανηγμένη παραμόρφωση στις δύο διαγωνίους (μήκους $d_1=d_2=d$) λόγω της μεταβολής του μήκους τους $\delta_1=\delta_2=\delta$ είναι ίδια κατ' απόλυτο τιμή και ίση με $\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon$, και το όριο της εφελκυστικής παραμόρφωσης είναι περίπου (βλ. παρ. 4.2) $\varepsilon_{ct}=0,0075\%$, η διατμητική παραμόρφωση ρηγμάτωσης του τοιχώματος είναι περίπου:

$$\begin{aligned}\gamma_{cr, τοιχ} &= \frac{\gamma_{1, τοιχ} + \gamma_{2, τοιχ}}{2} \approx \gamma_{1, τοιχ} = \frac{d\delta_{cr}}{h\ell} = \frac{d \cdot (\epsilon_{ct} d)}{h\ell} = \frac{\epsilon_{ct} d^2}{h\ell} = \\ &= \epsilon_{ct} \cdot \frac{1500 \text{ mm}^2}{750 \text{ mm} \times 1300 \text{ mm}} = 2.3 \epsilon_{ct} = 0.0075\% \times 2.3 = 0.17 \times 10^{-3} \text{ rads}\end{aligned}$$

Στο Σχ. 4.4 (βλ. Σχ. 3.44 του κεφ. 3.4) φαίνεται ότι πράγματι όταν η διατμητική παραμόρφωση του τοιχώματος λαμβάνει περίπου τιμή ίση με γ_{cr} , τότε παρατηρείται πτώση της κλίσης του αντίστοιχου διαγράμματος.



Σχήμα 4.4 – Κρίσιμη διατμητική παραμόρφωση τοιχώματος για ρηγμάτωση σκυροδέματος τοιχώματος (δοκίμιο Α8).

Στο Κεφ. 3.4, διαπιστώνεται ότι οι τιμές των διατμητικών παραμορφώσεων του τοιχώματος δεν καταδεικνύουν ενεργοποίηση διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος που αστοχεί σε σύνθλιψη μέχρι την επίτευξη της μέγιστης φέρουσας ικανότητας, ενώ λόγω των παραμορφώσεων της εφελκόμενης διαγωνίου και υπέρβαση της αντίστοιχης κρίσιμης διατμητικής παραμόρφωσης, γ_{cr} , ρηγματώνεται το σκυρόδεμα του τοιχώματος.

Στο Σχ. 3.44 (διάγραμμα της διατμητικής παραμόρφωσης του πλαισίου και του τοιχώματος σε σχέση με το οριζόντιο φορτίο), παρατηρείται ότι στην αρχή της φόρτισης τοίχωμα και πλαίσιο παραμορφώνονται μαζί σαν ενιαίο σύστημα και δεν παρατηρείται ρηγμάτωση στο τοίχωμα. Η κλίση του διαγράμματος $(P_h/\gamma)_{exp}$ συμφωνεί με την θεωρητική

κλίση, $(P_h/\gamma_{\text{συστ}})_{\text{uncr}} = 1062 \text{ MN/rad}$, της γραμμικής συμπεριφοράς ενός ενιαίου συστήματος «πλαίσιο-τοίχωμα» με αρηγμάτωτη διατομή εμβαδού $A_w (=0.085 \text{ m}^2)$ σε καθαρή διάτμηση.

Τοίχωμα και πλαίσιο, ενώ αρχικά παραμορφώνονται μαζί σαν ένα ενιαίο σύστημα, αρχίζουν να αναπτύσσουν διαφορετική διατμητική παραμόρφωση περίπου στο 1/4 της μέγιστης φέρουσας ικανότητας, σε σχετική μετακίνηση περίπου $d_h = 0.02\%$ (Βλέπε Πίν. 4.1).

Η αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης του τοιχώματος που παρατηρείται ακόμα και μετά το μέγιστο φορτίο και η μικρή διαφορά των γωνιακών παραμορφώσεων μεταξύ πλαισίου και τοιχώματος λόγω της εφελκυσμένης διαγωνίου μέχρι την επιβαλλόμενη σχετική μετακίνηση $d = 0.45\%$, μπορεί πιθανότατα να αποδοθεί στην παρουσία των «μακριών» βλήτρων, τα οποία επιτυγχάνουν και μετά το μέγιστο φορτίο τη διατήρηση κάποιου βαθμού σύνδεσης μεταξύ τοιχώματος και πλαισίου. Συνεπώς, το πλαίσιο λόγω της επιβαλλόμενης μετακίνησης στον φθίνοντα κλάδο απόκρισης υποβάλλει σε ένα βαθμό το τοίχωμα σε περαιτέρω διατμητική παραμόρφωση κυρίως λόγω της παραμόρφωσης στην κατεύθυνση της εφελκυσμένης διαγωνίου του. Βέβαια, η συνεχής αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης του τοιχώματος που παρατηρείται μετά το μέγιστο φορτίο στην διεύθυνση της θλιβόμενης διαγωνίου μπορεί να οφείλεται μερικώς στην συνεχή επαφή πλαισίου και τοιχώματος (καθεστώθ θλίψης) και άρα σε παραμόρφωση πλαισίου και τοιχώματος, αλλά κατά πάσα πιθανότητα η κύρια αιτία είναι άλλη. Μετά την επίτευξη της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου, στον φθίνοντα κλάδο απόκρισης αυξάνεται η πιθανότητα η αύξηση της παραμόρφωσης της θλιβόμενης διαγωνίου να οφείλεται σε λανθασμένη μέτρηση του αντίστοιχου w_g λόγω της χαλάρωσης των στηρίξεών του στην περιοχή των γωνιών των τοιχώματος, όπου υπάρχει εκτεταμένη αποδιοργάνωση του σκυροδέματος. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το σύρμα του w_g κατά τη λειτουργία του ευρίσκεται συνεχώς υπό τάνυση, άρα εάν η περιοχή αγκύρωσης των άκρων του σύρματος στο σκυρόδεμα ρηγματωθεί το σύρμα θα χαλαρώσει με αποτέλεσμα να καταγραφεί μείωση του μήκους του, δηλαδή θλιπτική παραμόρφωση.

Συγκρίνοντας την μετρηθείσα διατμητική παραμόρφωση του πλαισίου, $\gamma_{\pi\lambda}$, με μία «οριακή» διατμητική παραμόρφωση του πλαισίου με πλαστικές «αρθρώσεις» και μηδενική συνεργασία με το τοίχωμα, $\gamma_{\text{mech}} = \delta_h/h = d$ (Σχ. 3.45), διαπιστώνεται ότι, όπως αναμένεται, ισχύει πάντοτε: $\gamma_{\pi\lambda} \leq \gamma_{\text{mech}}$. Η τιμή $\gamma_{\pi\lambda}$, είναι αρχικά παρόμοια με αυτή του τοιχώματος, $\gamma_{\text{τοιχ}}$, δηλαδή πλαίσιο και τοίχωμα συνεργάζονται αποτελεσματικά αλλά όσο εξαντλείται η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου τόσο αυξάνεται και διαφοροποιείται σε σχέση με την αντίστοιχη του

τοιχώματος και πλησιάζει την τιμή, γ_{mech} . Το γεγονός ότι μετά την επίτευξη της μέγιστης φέρουσας ικανότητας η διατμητική παραμόρφωση του πλαισίου πλησιάζει σταδιακά την οριακή γωνιακή παραμόρφωση, γ_{mech} , μπορεί να αποδοθεί στη σταδιακή αποδιοργάνωση των βάσεων των υποστυλωμάτων με την αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης και τη μετατροπή τους πρακτικά σε «πλαστικές αρθρώσεις», με αποτέλεσμα το πλαίσιο να τείνει να γίνει μηχανισμός. Στον Πίν. 4.1 παρουσιάζεται η διατμητική παραμόρφωση του πλαισίου και του τοιχώματος για τον 1^ο κύκλο φόρτισης ως ποσοστό της οριακής διατμητικής παραμόρφωσης γ_{mech} για 4 τιμές της σχετικής οριζόντιας μετακίνησης στον αύξοντα κλάδο φόρτισης ($0.25P_{max}$, $0.5P_{max}$, $0.75P_{max}$ και P_{max}) και μία τιμή στον φθίνοντα κλάδο απόκρισης ($0.85P_{max}$).

Πίνακας 4.1 – Διατμητική παραμόρφωση πλαισίου, $\gamma_{\pi\lambda}$, και τοιχώματος, $\gamma_{τοιχ}$, δοκιμίου A8 ως ποσοστό «οριακής» διατμητικής παραμόρφωσης, γ_{mech} , σε διάφορα επίπεδα φόρτισης.

Σχετική μετακίνηση, d (%)	Οριζόντιο φορτίο, P_h	$\gamma_{\pi\lambda} / \gamma_{mech}$ (%)	$\gamma_{τοιχ} / \gamma_{mech}$ (%)
0.02	$0.25P_{h,max}$ (αύξων κλάδος)	71	62
0.06	$0.5P_{h,max}$ (αύξων κλάδος)	50	33
0.18	$0.5P_{h,max}$ (αύξων κλάδος)	56	22
0.36	$P_{h,max}$	80	35
0.54	$0.85P_{h,max}$ (φθίνων κλάδος)	85	33

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι η επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση στο δοκίμιο A8 δεν έχει ως αποτέλεσμα εξ' ολοκλήρου την γωνιακή παραμόρφωση πλαισίου και τοιχώματος λόγω διάτμησης, αλλά ένα μέρος της εισαγόμενης ενέργειας λόγω της επιβαλλόμενης μετακίνησης μετατρέπεται σε άλλου είδους παραμορφώσεις σε άλλα τμήματα του δοκιμίου λόγω καμπτικής λειτουργίας.

4.6. Σχετικές Μετακινήσεις Τοιχώματος με Περιβάλλον Πλαίσιο και Βάση Δοκιμίου

Στην αριστερή θέση μέτρησης αποκόλλησης του τοιχώματος από τη βάση αγκύρωσης μετά το φορτίο περίπου 175 kN, παρατηρείται μια απότομη αύξηση της τιμής της αποκόλλησης

κατά περίπου 100%. Στο ίδιο επίπεδο φόρτισης (φορτίο 175 kN) παρατηρείται απότομη αύξηση της αποκόλλησης κατά 100% του τοιχώματος από το αριστερό υποστύλωμα και αύξηση της σχετικής ολίσθησης κατά 75% του τοιχώματος σε σχέση με τη βάση στην αριστερή θέση μέτρησης, όπου ωστόσο η σχετική ολίσθηση αλλάζει κατεύθυνση. Διαπιστώνεται ότι κάποια αστοχία στις διεπιφάνειες κοντά στην αριστερή γωνία του τοιχώματος οδηγεί σε διεύρυνση της αποκόλλησης του τοιχώματος από το αριστερό υποστύλωμα, κάτι το οποίο δικαιολογεί την πτώση απόκρισης που παρατηρείται στο ίδιο βήμα της θετικής φόρτισης (βλ. Σχ. 3.1, διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης P-δ του δοκιμίου A8, παρ. 3.1).

Παρατηρείται ότι η τιμή των αποκολλήσεων και των σχετικών ολισθήσεων του τοιχώματος για την αρνητική φόρτιση είναι πάντα ίση ή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για τη θετική φόρτιση. Επίσης, στα διαγράμματα των κύκλων της αρνητικής φόρτισης παρατηρούνται αρχικές μόνιμες σχετικές μετακινήσεις διότι η θετική φόρτιση προηγήθηκε. Όταν επιβάλλεται η οριζόντια μετακίνηση στην αρνητική φόρτιση, το δοκίμιο έχει ήδη υποστεί κάποια βλάβη για την ίδια επιβαλλόμενη μετατόπιση στην προηγούμενη θετική διεύθυνση με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μειωμένη αντίσταση στη διεύρυνση των αποκολλήσεων και στην ανάπτυξη περαιτέρω ολισθήσεων.

Επιπροσθέτως, μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, παρατηρείται εν γένει σταθεροποίηση των τιμών αποκολλήσεων και ολισθήσεων στην πάνω διεπιφάνεια του τοιχώματος με τη δοκό, σε αντιδιαστολή με την ραγδαία αύξηση των τιμών στην κάτω διεπιφάνεια με τη βάση. Δηλαδή, πραγματοποιείται εκτόνωση των σχετικών μετακινήσεων τοιχώματος-δοκού μέχρι το μέγιστο φορτίο, και αμέσως μετά η συγκέντρωση των βλαβών λαμβάνει χώρα μόνο στη διεπιφάνεια τοιχώματος-βάσης μέχρι την τελική αστοχία.

Με βάση τα Σχ. 3.50 έως 3.54 παρατηρείται ότι η μέγιστη ολίσθηση αυξάνεται με αύξηση της μέγιστης αποκόλλησης. Η σχέση μεταξύ ολίσθησης και αποκόλλησης φαίνεται ότι είναι ανάλογη, όχι όμως γραμμική. Το μοντέλο του Rasmussen (1962) φαίνεται να εκτιμά αρκετά ικανοποιητικά τη σχέση αποκόλλησης-σχετικής ολίσθησης στη κάτω διεπιφάνεια (τοιχώμα-βάση), ωστόσο στη πάνω διεπιφάνεια (τοιχώμα-δοκός) δεν είναι σωστή η εκτίμηση, πιθανότατα λόγω της μη ισχύος του μοντέλου σε καθεστώς πολύ μικρών τιμών αποκόλλησης και σχετικής ολίσθησης.

Η παραμένουσα αποκόλληση, δηλαδή η αποκόλληση όταν η ολίσθηση μηδενίζεται, αυξάνεται με την αύξηση της ολίσθησης κατά τη πρόοδο της ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Επίσης, αυξάνεται όταν οι διατμητικοί σύνδεσμοι αρχίζουν να παραμορφώνονται πλαστικά

λόγω διαρροής. Η αποκόλληση γενικά ενισχύεται από την τοπική ολίσθηση των ράβδων στη διεπιφάνεια σε σχέση με το σκυρόδεμα και κυρίως στο πιο «αδύναμο» σκυρόδεμα (τοιχώμα), από παραμόρφωση (επιμήκυνση) των ράβδων και από την τραχύτητα της διεπιφάνειας.

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (παρ. 8.1.2.3) η μέγιστη ανεκτή ολίσθηση σε διεπιφάνεια για τις στάθμες επιτελεστικότητας Α, Β και Γ είναι ίση με 0.2, 0.4 και 1.0 mm, αντίστοιχα. Στο μέγιστο φορτίο η ολίσθηση στην κάτω διεπιφάνεια έχει απόλυτη τιμή 0.70 mm, ενώ η ολίσθηση στην πάνω διεπιφάνεια 0.40 mm. Οι τιμές αυτές στην πρωτότυπη κατασκευή είναι $0.7 \times 3 = 2.1$ mm και $0.4 \times 3 = 1.2$ mm για την πάνω και κάτω διεπιφάνεια, αντίστοιχα. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι η αναπτυσσόμενη σχετική ολίσθηση του τοιχώματος στις διεπιφάνειες με τη βάση και με τη δοκό δεν επιτρέπεται για καμία από τις 3 στάθμες επιτελεστικότητας του Κανονισμού.

4.7. Πλαστιμότητα - Δυσκαμψία/Δυσστησία

Διαπιστώνεται ότι στην θετική φόρτιση η τιμή των συμβατικών οριζόντιων μετακινήσεων δ_y και δ_u και ο δείκτης πλαστιμότητας μετακινήσεων, μ_δ , παρουσιάζουν κατά τι υψηλότερες τιμές απ' ότι στην αρνητική φόρτιση. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι το θετικό φορτίο προηγείται του αρνητικού.

Οι επιβατικές δυσκαμψίες K_y και K_{Pmax} έχουν υψηλότερη τιμή στην αρνητική φόρτιση, επειδή γι' αυτή την κατεύθυνση φόρτισης η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου είναι υψηλότερη.

Κεφάλαιο 5^ο : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A8 ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

5.1 Φέρουσα Ικανότητα

Γίνεται χρήση τριών μοντέλων για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου A8 και τη σύγκριση με την πειραματική τιμή. Αυτά είναι του ΚΑΝ.ΕΠΕ., του Αμερικάνικου Κανονισμού FEMA 306 και το μοντέλο ισοδύναμου ενιαίου τοιχώματος. Οι εκτιμήσεις των αντοχών που γίνονται στις παρ. 5.1.1 έως 5.1.3, έχουν προκύψει για τις πραγματικές τιμές αντοχής χάλυβα και σκυροδέματος και όχι για τις αντοχές σχεδιασμού (δηλαδή $\gamma_c = \gamma_s = 1$).

5.1.1 Μοντέλο ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στη φέρουσα ικανότητα ενός ενισχυμένου πλαισίου συνεισφέρουν τρία δομικά στοιχεία: το πλαίσιο, ο διαγώνιος θλιπτήρας του τοιχώματος και τα βλήτρα (διατμητικοί σύνδεσμοι).

1. Αντοχή πλαισίου σε τέμνουσα (υπολογισμένη με βάση τον ΕΚΩΣ2000)

α) Στοιχεία υποστυλωμάτων:

$f_{cc} = 35.58 \text{ MPa}$ (θλιπτική αντοχή σκυροδέματος)

$b_w = 0.10 \text{ m}$ (πλάτος διατομής υποστυλώματος)

$h = 0.10 \text{ m}$ (ύψος διατομής υποστυλώματος)

$c = 0.012 \text{ m}$ (επικάλυψη οπλισμού)

$\Phi_L = 6 \text{ mm}$ (διάμετρος διαμήκους οπλισμού)

$\Phi_w = 3 \text{ mm}$ (διάμετρος συνδετήρων)

$d = 0.085 \text{ m}$ (στατικό ύψος διατομής υποστυλώματος)

$A_{s,tot} = 8\Phi 6 = 2.26 \text{ cm}^2$ (συνολικό εμβαδό διαμήκους οπλισμού)

$\rho = 0.85 \%$, (γεωμετρικό ποσοστό διαμήκους εφελκόμενου οπλισμού)

$A_{sw/s} = 2\Phi 3/8 \text{ cm} = 1.77 \text{ cm}^2/\text{m}$ (εμβαδό δίτμητων συνδετήρων)

$A_{sw/s} (\text{κρ.}) = 2\Phi 3/4 \text{ cm} = 3.53 \text{ cm}^2/\text{m}$ (εμβαδό δίτμητων συνδετήρων στις κρίσιμες περιοχές)

β) Αντοχή διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος V_{Rd2} :

$$V_{Rd2} = 0.5 v f_c b_w 0.9 d = 71.05 \text{ kN}$$

$$\text{όπου } v = 0.7 - \frac{f_c}{200} = 0.522$$

γ) Αντοχή σκυροδέματος V_{Rd1} :

$$V_{Rd1} = \left[\tau_{Rd} k (1.20 + 40 \cdot \rho_l) + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w d = 11.50 \text{ kN}$$

όπου:

$$\tau_{Rd} = 0.25f_{ctk0.05} = 0.25 \times 2.235 = 0.559 \text{ MPa} , \text{ η διατμητική αντοχή του σκυροδέματος, και}$$

σ_{cp} = ορθή τάση στη διατομή λόγω αξονικής δύναμης (= 0).

Λόγω ανακύκλισης και επειδή $v_d = \frac{N_{sd}}{f_c A_c} = 0 > -0.1$, ως συνεισφορά του σκυροδέματος

λαμβάνεται η:

$$V_{cd} = 0.3V_{Rd1} = 3.45 \text{ kN}$$

δ) Αντοχή εγκάρσιου οπλισμού V_{wd} :

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} 0.9d f_{wy} = 15.14 \text{ kN}$$

όπου $f_{wy} = 560 \text{ MPa}$, το όριο διαρροής του χάλυβα των συνδετήρων.

Συνεπώς, η αντοχή της διατομής του υποστυλώματος σε τέμνουσα είναι:

$$V_{Rc} = V_{cd} + V_{wd} = 18.59 \text{ kN}$$

Άρα, η αντοχή του πλαισίου σε τέμνουσα είναι:

$$V_{frame} = 2V_{Rc} = 37.18 \text{ kN}$$

2. Αντοχή διαγώνιου θλιπτήρα τοιχώματος (με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.)

α) Στοιχεία τοιχώματος:

$f_{cc} = 21.69 \text{ MPa}$, (θλιπτική αντοχή σκυροδέματος)

$t_w = 0.05 \text{ m}$, (πάχος)

$\ell_w = 1.30 \text{ m}$, (μήκος)

$h_w = 0.75 \text{ m}$, (ύψος)

$L = 1.50 \text{ m}$, (μήκος διαγωνίου)

β) Αντοχή διαγώνιου θλιπτήρα τοιχώματος:

$$N_R = \lambda f'_c t_w b_w = 58.57 \text{ kN}$$

όπου $\lambda=0.40$ συντελεστής απομένουσας απόκρισης του διαγώνιου θλιπτήρα μετά την υπέρβαση της κρίσιμης παραμόρφωσής του, και $f'_c = 0.6f_c = 13 \text{ MPa}$ η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό και

$$b_w = 0,15L = 0.23 \text{ m} \quad (5.1)$$

Στον παραπάνω υπολογισμό της N_R , ως ενεργό πλάτος θλιπτήρα λήφθηκε η τιμή $b_w=0,15L$ που προτείνεται για την περίπτωση εμφανιζόμενων τοιχοποιιών. Βέβαια η εκτίμηση του ενεργού πλάτους του διαγώνιου θλιπτήρα (Σχέση 5.1) γίνεται με βάση το συμβιβαστό των παραμορφώσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρ. 7.4.1(ζ.2)),

$$b_w \approx L(f_{wv} / f_{wc,s}) \quad (5.2)$$

όπου f_{wv} = διατμητική αντοχή τοιχοπλήρωσης και $f_{wc,s}$ = θλιπτική αντοχή τοιχοπλήρωσης κατά την διαγώνιο συνεκτιμώντας και την απομείωσή της λόγω των εγκάρσιων εφελκυστικών τάσεων. Στην περίπτωση εμφάνισης τοιχώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα, για τον προσδιορισμό της σχέσης που συνδέει τα μεγέθη b_w και L θα πρέπει να ληφθούν οι αντίστοιχες τιμές αντοχών για το τοίχωμα:

$$f_{wv} = \tau_{Rd} + \tau_s = 0.25f_{ctk,0.05} + \rho_s f_y = 0.25 \times 1.602 + 0.00784 \times 500 = 4.32 \text{ MPa}$$

και

$$f_{wc,s} = v f_c = 0.6 \times 21.69 = 13 \text{ MPa}$$

όπου $\rho_{sv} f_y$ είναι η συμμετοχή των κατακόρυφων ράβδων του διπλού ορθογωνικού πλέγματος οπλισμού ($2\emptyset 5/100 \times 50 \text{ mm}^2$) στη διατμητική αντοχή του τοιχώματος. Το «ισοδύναμο» πλάτος, b_w , του ενεργοποιημένου θλιπτήρα αντικαθιστώντας τις αντίστοιχες τιμές αντοχών του σκυροδέματος του τοιχώματος στη σχέση (5.2) προκύπτει:

$$b_w \approx L(f_{wv} / f_{wc,s}) = L(4.32 / 13.01) = 0.33L > 0.15L$$

Άρα, με την υπόθεση $b_w = 0.33L$:

$$N_R = \lambda f'_c t_w b_w = 128.86 \text{ kN}$$

και η μέγιστη τέμνουσα που αναλαμβάνει το τοίχωμα είναι:

$$F_s = \frac{\ell}{L} N_R = 111.68 \text{ kN}$$

3. Αντοχή βλήτρων στην κρίσιμη διεπιφάνεια

α) Στοιχεία βλήτρων:

$d_b = 6 \text{ mm}$ (διάμετρος ράβδου)

$f_c = 21.69 \text{ MPa}$ (θλιπτική αντοχή του ασθενέστερου σκυροδέματος)

$f_y = 470 \text{ MPa}$ (όριο διαρροής του χάλυβα του βλήτρου)

$A_s = 0.28 \text{ cm}^2$ (εμβαδόν της ράβδου)

$n_{\delta, \text{οριζ}} = 13$ (αριθμός βλήτρων στην οριζόντια διεπιφάνεια)

β) Αντοχή μεμονωμένου βλήτρου (υπό ανακυκλιζόμενη δράση):

$$F_{ud} = 0.65 d_b^2 \sqrt{f_{cd} f_{yd}} \leq \frac{A_s f_{yd}}{\sqrt{3}}, [\text{mm}, \text{MPa}]$$

$$F_{ud} = 2.36 \text{ kN} < 7.67 \text{ kN}$$

Άρα, το άνω όριο της συνολικής αντοχής των βλήτρων εκτιμάται ως:

$$F_{\beta\lambda, \text{οριζ}} = 0.5 n_{\delta, \text{οριζ}} F_{ud} = 15.36 \text{ kN}$$

4. Διατμητική αντοχή πλαισίου με εμφαννόμενο τοίχωμα

$$V_s = V_{\text{frame}} + F_s + F_{\beta\lambda, \text{οριζ.}} = 37.18 + 111.68 + 15.36 = 164.22 \text{ kN}$$

Πειραματικά, προέκυψε ότι $V_{\text{max,exp}} = 231.03 \text{ kN}$, επομένως $V_s/V_{\text{max,exp}} = 0.71$.

Παρατηρείται απόκλιση μεταξύ της πειραματικής τιμής και της τιμής με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Παρατηρείται περίπου 30% διαφορά μεταξύ της πειραματικής τιμής και της τιμής με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.. Θα μπορούσε να βελτιωθεί η εκτίμηση της μέγιστης φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου αν: α) λάβουμε συντελεστή απομένουσας απόκρισης διαγώνιου θλιπτήρα λ μεγαλύτερο του 0.4, λόγω της μη υπέρβασης της κρίσιμης θλιπτικής παραμόρφωσης του τοιχώματος, β) λάβουμε μεγαλύτερο ενεργό πλάτος θλιπτήρα, ή γ) λάβουμε υπόψη μεγαλύτερη συμμετοχή βλήτρων στην αντοχή της κάτω διεπιφάνειας με τη βάση, λόγω του ικανοποιητικού μήκους αγκύρωσής τους και της ανάπτυξης σημαντικών τιμών ολίσθησης σε όλο το μήκος της διεπιφάνειας.

Παρατηρήθηκε ότι η αστοχία επήλθε λόγω της διατμητικής αστοχίας στο επίπεδο της κάτω διεπιφάνειας (βλ. κεφ. 3.2). Για τον λόγο αυτόν θα γίνει εκτίμηση της αντοχής τριών οριζόντιων διατομών (συμπεριλαμβανομένων των υποστυλωμάτων και του τοιχώματος) καθ' ύψος του δοκιμίου, ώστε να ελεγχθεί ο κρίσιμος τρόπος αστοχίας.

1. Αντοχή σε τέμνουσα της διατομής στο επίπεδο της κάτω διεπιφάνειας (τοιχώμα-βάση)

Για την εκτίμηση της αντοχής λαμβάνεται υπόψη η διατμητική αντοχή του πλαισίου (υποστυλώματα) και η διατμητική αντοχή της κάτω διεπιφάνειας. Όσο αφορά το πλαίσιο η αντοχή υπολογίστηκε παραπάνω, $V_{\text{frame}} = 37.18 \text{ kN}$.

Για την αντοχή της διεπιφάνειας χρησιμοποιείται η πρόταση των Tassios & Vassilopoulou (2003). Συγκεκριμένα η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας δίνεται από την σχέση (5.3).

$$\tau_u = \beta_d \tau_d + \beta_f \tau_f \quad (5.3)$$

όπου β_f = συντελεστής συμμετοχής του μηχανισμού τριβής (40 -70%) και β_d = συντελεστής συμμετοχής του μηχανισμού βλήτρων (60-70%), τ_u = διατμητική αντοχή διεπιφάνειας, τ_f = μέγιστη διατμητική αντοχή λόγω τριβής και τ_d = μέγιστη διατμητική αντοχή λόγω βλήτρων (Tassios & Vintzeleou, 1987).

Η τ_f μπορεί να υπολογιστεί από την Σχέση (5.4), η οποία είναι πρακτικά ίδια με την σχέση που προτείνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. (§6.1.1.5 (β), Σχέση (6.7)).

Είναι:

$$\tau_f = 0.44 \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \rho f_{yd}} \quad (5.4)$$

όπου f_c = θλιπτική αντοχή σκυροδέματος τοιχώματος, ρ = γεωμετρικό ποσοστό διατμητικών συνδέσμων κάθετων στην διεπιφάνεια και f_{yd} = τάση διαρροής χάλυβα των συνδέσμων.

Προκύπτει ότι: $\tau_f = 0.44 \sqrt[3]{21.69^2 \cdot 0.0057 \cdot 470} = 4.74 \text{ MPa}$

Επίσης, είναι: $\tau_d = \frac{F_{\beta\lambda, \text{οριζ}}}{A_c} = 0.24 \text{ MPa}$,

όπου A_c = εμβαδόν της οριζόντιας διατομής του τοιχώματος.

Λαμβάνοντας συντελεστές συμμετοχής για μηχανισμό τριβής $\beta_f = 60\%$ και για μηχανισμό βλήτρων $\beta_d = 60\%$, προκύπτει:

$$\tau_u = 0.6 \times 0.24 + 0.6 \times 4.74 = 2.99 \text{ MPa}$$

Επομένως η διατμητική αντοχή της κάτω διεπιφάνειας εκτιμάται σε δύναμη:

$$V_\delta = \tau_u A_c = 194.10 \text{ kN}$$

Άρα, η συνολική διατμητική αντοχή της κάτω διατομής εκτιμάται ως:

$$V_u = V_{\text{frame}} + V_{\delta} = 194.10 + 37.18 = 231.28 \text{ kN}$$

Παρατηρείται ότι η τιμή που εκτιμήθηκε για τη διατμητική αντοχή συμφωνεί απόλυτα με την πειραματική μέγιστη φέρουσα ικανότητα.

2. Αντοχή σε τέμνουσα της οριζόντιας διατομής στο μέσον του ύψους του δοκιμίου

Εδώ δε συμμετέχει κάποια διεπιφάνεια, αλλά η αντοχή βρίσκεται προσθέτοντας την διατμητική αντοχή των υποστυλωμάτων και του τοιχώματος.

Στο μέσον του ύψους των υποστυλωμάτων οι συνδετήρες έχουν τη διπλάσια απόσταση μεταξύ τους απ' ότι στον πόδα και τη κεφαλή τους, συνεπώς η νέα αντοχή του πλαισίου είναι:

$$V_{\text{frame}} = 2(V_{\text{cd}} + \frac{V_{\text{wd}}}{2}) = 2(3.45 + \frac{15.14}{2}) = 22.04 \text{ kN}$$

Η διατμητική αντοχή του τοιχώματος, υπολογίστηκε στη διαδικασία υπολογισμού του b_w (Βλέπε σελ. 93) ως:

$$f_{\text{wv}} = 4.32 \text{ MPa}$$

$$\text{Επομένως, } V_{\text{infill}} = f_{\text{wv}} \cdot A_c = 4.32 \cdot 0.05 \cdot 1.30 \cdot 1000 = 280.8 \text{ kN}$$

Άρα η συνολική διατμητική αντοχή της διατομής στο μέσον του ύψους είναι:

$$V_u = V_{\text{frame}} + V_{\text{infill}} = 22.04 + 280.8 = 302.84 \text{ kN}$$

Παρατηρείται ότι η αντοχή σε τέμνουσα προέκυψε μεγαλύτερη από αυτή στη κάτω διεπιφάνεια.

3. Αντοχή σε τέμνουσα της διατομής στο επίπεδο της πάνω διεπιφάνειας (τοιχώμα-δοκός)

Τώρα όσο αφορά το πλαίσιο, οι συνδετήρες από την πάνω παρειά του υποστυλώματος με τη δοκό (επίπεδο διεπιφάνειας) και εντός του κόμβου μέχρι και τη διεπιφάνεια έχουν απόσταση μεταξύ τους 3 cm, και επιπλέον λαμβάνονται υπόψη οι 2 διαγώνιοι ράβδοι που διατρέχουν το κόμβο και διαπερνούν τη διατομή στο επίπεδο της διεπιφάνειας.

Η νέα διατμητική αντοχή του εγκάρσιου οπλισμού είναι:

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} 0.9d f_{wy} = 30.28 \text{ kN}$$

Επομένως: $V_{frame} = 2(V_{cd} + V_{wd}) = 2(3.45 + 30.28) = 67.47 \text{ kN}$

Η αντοχή της πάνω διεπιφάνειας είναι η ίδια με την κάτω με την εξαίρεση ότι τα βλήτρα, εάν η διεπιφάνεια ήταν κρίσιμη, πιθανότατα θα είχαν μειωμένη συμμετοχή στο μηχανισμό βλήτρου λόγω του μικρότερου μήκους αγκύρωσης στη δοκό από τη βάση. Για το λόγο αυτό πολλαπλασιάζεται η μέγιστη δυνατή αντοχή τους για μηχανισμό βλήτρου, τ_d , με τον λόγο των δύο μηκών έμπηξης (αγκύρωσης) στη δοκό και βάση, αντίστοιχα.

$$\tau_d = 0.24 \cdot \frac{60}{129} = 0.12 \text{ MPa}$$

Λαμβάνοντας τους ίδιους συντελεστές συμμετοχής των μηχανισμών, $\beta_f = 60\%$ και $\beta_d = 60\%$, προκύπτει:

$$\tau_u = (0.6 \times 0.12) + (0.6 \times 4.74) = 2.92 \text{ MPa}$$

Επομένως, η διατμητική αντοχή της κάτω διεπιφάνειας σε δύναμη εκτιμάται ως:

$$V_\delta = \tau_u \cdot A_c = 189.50 \text{ kN}$$

Άρα, η συνολική διατμητική αντοχή της πάνω διατομής είναι:

$$V_u = V_{frame} + V_\delta = 189.50 + 67.47 = 256.97 \text{ kN}$$

Παρατηρείται λοιπόν ότι η αντοχή σε τέμνουσα στην πάνω διεπιφάνεια προέκυψε κι αυτή μεγαλύτερη από αυτή της διατομής του επιπέδου της κάτω διεπιφάνειας (μικρότερη όμως από αυτή στο μέσον καθ' ύψος επίπεδο).

Επιβεβαιώνεται, λοιπόν, ότι η κρίσιμη διατομή είναι αυτή στο επίπεδο της κάτω διεπιφάνειας (ως η μικρότερη των τριών), όπου και παρατηρείται η αστοχία πειραματικά.

5.1.2 Μοντέλο FEMA 306

Για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του τοιχώματος, ο Αμερικάνικος Κανονισμός χρησιμοποιεί ως βάση τη μελέτη του Mainstone (1971). Η αντοχή υπολογίζεται αναλύοντας τέσσερα (4) πιθανά μοντέλα αστοχίας του τοιχώματος.

1. Ολισθαίνουσα-διατμητική αστοχία

Αυτός ο τύπος αστοχίας δεν απαντάται στην περίπτωση του παρόντος πειράματος, καθώς προορίζεται για τοιχοποιία. Στην παρούσα περίπτωση υπάρχει μόνο με τη μορφή ολίσθησης του τοιχώματος στην κάτω διεπιφάνεια (με τη βάση αγκύρωσης).

2. Θλιπτική αστοχία στο τοίχωμα

Αντοχή τοιχώματος:

$$V_c = \alpha t_{inf} f_c \cos \theta = 127.97 \text{ kN}$$

όπου:

$\alpha = 0.175 (\lambda_1 h_{col})^{-0.4} r_{inf} = 0.14 \text{ m}$ είναι το πλάτος του ισοδύναμου διαγώνιου θλιπτήρα σύμφωνα με τον Mainstone (1971), $r_{inf} = 1.5 \text{ m}$, το μήκος της διαγωνίου του τοιχώματος,

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_m t_{inf} \sin 2\theta}{4E_f I_{col} h_{inf}} \right] = 6.25 \text{ (Stafford-Smith and Carter, 1969),}$$

$t_{inf} = 0.05 \text{ m}$, το πάχος του τοιχώματος

$\theta = 0.52 \text{ rad}$, η γωνία που σχηματίζει η διαγώνιος του τοιχώματος με την οριζόντια πλευρά του

$E_f = 33.01 \text{ GPa}$, το μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος του πλαισίου

$I_{col} = 833.3 \text{ cm}^4$, η ροπή αδράνειας του ενός υποστυλώματος του πλαισίου

$h_{inf} = 0.75 \text{ m}$, το ύψος του τοιχώματος

3. Αστοχία με διαγώνιο εφελκυσμό στο τοίχωμα

Χρησιμοποιείται η σχέση για την αντοχή σε τέμνουσα, που προτείνεται από τους Saneinejad and Hobbs (1995):

$$V_{cr} = \frac{2\sqrt{2} t_{inf} \sigma_{cr}}{\left(\frac{L_{inf}}{h_{inf}} + \frac{h_{inf}}{L_{inf}} \right)} = 142.84 \text{ kN}$$

όπου $t_{inf} = 0.05 \text{ m}$, το πάχος του τοιχώματος $\sigma_{cr} = f_{ctm} = 0.3f_{ck}^{2/3} = 2.33 \text{ MPa}$, η μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος του τοιχώματος, και $L_{inf} = 1.30 \text{ m}$, το οριζόντιο μήκος του τοιχώματος.

4. Καθαρή διατμητική αστοχία του τοιχώματος

Η αντοχή υπολογίζεται με βάση τις προτάσεις των Paulay and Priestley (1992). Κατ' αρχήν η διατμητική αντοχή του τοιχώματος για μονοτονική φόρτιση, είναι:

$$V_{mi} = A_{vh} 2\sqrt{f_c} = 19.15 \text{ kN} ,$$

όπου $A_{vh} = L_{inf} t_{inf} = 0.065 \text{ m}^2$, το καθαρό εμβαδό της οριζόντιας διατομής του τοιχώματος και $f_c = 21.69 \text{ MPa}$, η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος του τοιχώματος.

Η διατμητική αντοχή του τοιχώματος σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι:

$$V_{mf} = 0.3 V_{mi} = 5.75 \text{ kN} .$$

Επιπλέον, η συμβολή του οπλισμού του τοιχώματος στη διατμητική αντοχή του κατά τις διατάξεις του Αμερικάνικου Κανονισμού ACI 318-95 (ACI, 1995) είναι:

$$V_s = \rho_w f_{ye} A_{vh} = 254.8 \text{ kN}$$

όπου $\rho_w = 2A_{s(\Phi 5)} / (5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}) = 0.00784$, το ογκομετρικό ποσοστό του πλέγματος οπλισμού στο τοίχωμα, και $f_{ye} = 500 \text{ MPa}$, η τάση διαρροής του χάλυβα οπλισμού του τοιχώματος. Άρα η αντοχή του τοιχώματος έναντι καθαρής διατμητικής αστοχίας είναι: $5.75 + 254.8 = 260.54 \text{ kN}$

Άρα το μοντέλο του FEMA 306 εκτιμάει ως φέρουσα ικανότητα του τοιχώματος την :

$$V_c = 127.97 \text{ kN}$$

με κρίσιμη αστοχία τη θλιπτική αστοχία του τοιχώματος.

Με βάση τις εκτιμηθείσες αντοχές και την πειραματική τιμή της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου A8 (βλ. παρ. 3.3.1), διαπιστώνεται, ότι δεν αναπτύσσεται στο τοίχωμα διαγώνια δύναμη ικανή για να προκληθεί κάποια από τις τέσσερις παραπάνω πιθανές αστοχίες στο τοίχωμα. Πράγματι, όπως φαίνεται και από την εικόνα αστοχίας του δοκιμίου, το τοίχωμα δεν οδηγείται σε αστοχία με κάποιο τρόπο, παρά μόνο εμφανίζει κάποιες τοπικές ρηγματώσεις σκυροδέματος, όπως τοπική σύνθλιψη σκυροδέματος στις γωνίες και σημαντικές βλάβες στις διεπιφάνειες, στα βλήτρα και στις βάσεις των υποστυλωμάτων.

Για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής του πλαισίου χρησιμοποιείται ως βάση από τον κανονισμό η μελέτη του Priestley et al. (1996).

Διατμητική αντοχή υποστυλωμάτων

α) Αντοχή σκυροδέματος V_c :

$$V_c = k\sqrt{f_c} b_w d = 5.02 \text{ kN}$$

όπου:

$k=3.5$, συντελεστής που εξαρτάται από τον δείκτη πλαστιμότητας του μέλους, f_c , θλιπτική αντοχή σκυροδέματος πλαισίου, b_w , το πλάτος της διατομής, d το στατικό ύψος της διατομής, και σ_{cp} η ορθή τάση στη διατομή λόγω αξονικής δύναμης ($= 0$).

β) Αντοχή εγκάρσιου οπλισμού V_s :

$$V_s = A_{sh} f_{yh} \frac{j_d}{s} \cot \theta = 15.04 \text{ kN}$$

όπου:

$f_{yh} = 560 \text{ MPa}$, το όριο διαρροής του χάλυβα των συνδετήρων, A_{sh} , το εμβαδό της διατομής των δίτητων συνδετήρων, $j_d = 0.076 \text{ m}$, ο εσωτερικός μοχλοβραχίονας της διατομής, s η απόσταση μεταξύ 2 διαδοχικών συνδετήρων και $\cot \theta = 1$ για γωνία των αναπτυσσόμενων ρωγμών σε σχέση με τον άξονα του υποστυλώματος, $\theta = 45^\circ$.

Συνεπώς, η αντοχή της διατομής ενός υποστυλώματος σε τέμνουσα είναι:

$$V_u = V_s + V_c = 20.06 \text{ kN}$$

Αρα, η αντοχή του πλαισίου (2 υποστυλώματα) σε τέμνουσα είναι:

$$V_{frame} = 2V_u = 40.12 \text{ kN}$$

Αρα, η συνολική αντοχή του εμφανιζόμενου πλαισίου σε τέμνουσα προσθέτοντας τις αντοχές τοιχώματος και πλαισίου προκύπτει 148.03 kN , η οποία αντιστοιχεί στο 64% της πειραματικής φέρουσας ικανότητας.

5.1.3 Μοντέλο ισοδύναμου ενιαίου τοιχώματος

Για την εκτίμηση της αντοχής σε κάμψη του δοκιμίου A8, το σύστημα πλαίσιο-τοίχωμα θεωρείται ως ένα ισοδύναμο ενιαίο τοίχωμα πακτωμένο στη βάση αγκύρωσης. Με βάση τον ΕΚΩΣ2000 και Ευρωκώδικα 2, στην κρίσιμη διατομή της βάσης του τοιχώματος (κάτω διεπιφάνεια) και πλαισίου (βάση υποστυλωμάτων) σχήματος διπλού-T και συνολικού μήκους 1.50 m , γίνεται θεώρηση ομοιόμορφης θλιπτικής τάσης σκυροδέματος σε βάθος διατομής $0.8x_u$ εντός της διατομής του θλιβόμενου υποστυλώματος (x_u =βάθος θλιβόμενης ζώνης σκυροδέματος). Επειδή, το x_u είναι μικρότερο από την διάσταση του υποστυλώματος στο επίπεδο του πλαισίου (0.10 m), το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης, b , λαμβάνεται ίσο με την εγκάρσια διάσταση του υποστυλώματος (0.10 m).

Επίσης, εάν θεωρηθεί σύνθλιψη σκυροδέματος στην ακραία ίνα της εξωτερικής παρειάς του θλιβόμενου υποστύλωματος ($\epsilon_{cu} = -0.0035$) ο θλιβόμενος διαμήκης οπλισμός κοντά στη εξωτερική παρεία του υποστύλωματος ($3\phi 6 = 0.85 \text{ cm}^2$) και ο συνολικός διαμήκης οπλισμός στο εφελκυσμένο υποστύλωμα ($8\phi 6 = 2.26 \text{ cm}^2$) θα πρέπει να διαρρέουν. Βέβαια, οι πολύ χαμηλές τιμές της ανηγμένης παραμόρφωσης στον διαμήκη οπλισμό #12 δεν υποστηρίζουν αυτήν την θεώρηση. Στην εφελκυστική δύναμη της διατομής βάσης, περιλαμβάνεται η δύναμη διαρροής των $8\phi 6$ διαμήκων ράβδων στη βάση του εφελκυσμένου υποστύλωματος $F_{sy,col} = 79 \text{ kN}$ σε απόσταση $d = 1.45 \text{ m}$ από την ακραία θλιβόμενη ίνα της διατομής και η δύναμη διαρροής, $F_{sy,d} = 93 \text{ kN}$, τουλάχιστον επτά (7) κατακόρυφων βλήτρων (1.98 cm^2), που ευρίσκονται πλησιέστερα σ' αυτό (περίπου τα μισά από τα 13 βλήτρα στην κάτω διεπιφάνεια) σε απόσταση $d = 1.08 \text{ m}$. Με βάση τα παραπάνω και μια πολύ συντηρητική υπόθεση ότι τα υπόλοιπα 6 βλήτρα πλησιέστερα στο θλιβόμενο υποστύλωμα δεν συμμετέχουν στην εφελκυστική δύναμη, προκύπτει καμπτική ροπή αστοχίας, $M_u = 210 \text{ kNm}$.

Άρα, η οριζόντια τέμνουσα βάσης, $F_{u,fl}$, για να αναπτυχθεί η καμπτική αντοχή, M_u , είναι:

$$F_{u,fl} = \frac{M_u}{h} = \frac{210 \text{ kNm}}{0.825 \text{ m}} = 255 \text{ kN}$$

Παρατηρείται ότι η σχετικά συντηρητική εκτίμηση της αντοχής σε οριζόντια δύναμη για καμπτική αστοχία του ενιαίου τοιχώματος είναι μόνο 10% υψηλότερη από την πειραματική φέρουσα ικανότητα (231 kN). Πράγματι, το δοκίμιο A8 αστόχησε κυρίως διατμητικά (βλ. κεφ. 3.2), αλλά υπήρξαν και δευτερεύουσες ενδείξεις καμπτικής λειτουργίας.

5.2 Δυσκαμψία/Δυσστησία

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση των πειραματικών τιμών δυσκαμψίας του συστήματος με τιμές που βασίζονται σε αναλυτικά μοντέλα άλλων ερευνητών. Συγκεκριμένα εξετάζεται το μοντέλο καμπτόμενης δοκού με διάτμηση (shear-beam concept) των Fiorato et al. (1970) και το μοντέλο ισοδύναμου διαγώνιου θλιπτήρα, για τον οποίο προτείνονται διάφορα πλάτη θλιπτήρα από πλήθος ερευνών και κανονισμών.

Έχει διαπιστωθεί (Stafford Smith and Carter, 1969) ότι η σύνθετη συμπεριφορά ενός ενισχυμένου πλαισίου με φάτνωμα καθιστά τη πλευρική δυσκαμψία του συστήματος εξαρτημένη όχι μόνο από την δυσκαμψία και δυστημψία του πλαισίου και του φαντώματος, αλλά και από τη σχετική δυσκαμψία μεταξύ τους.

5.2.1 Μοντέλο “shear-beam”

Στο μοντέλο καμπτόμενης δοκού με διάτμηση (shear-beam concept) η πλευρική δυσκαμψία/δυστημψία λαμβάνεται από τη Σχέση 5.3,

$$K_w = \frac{1}{\frac{1}{K_{sh}} + \frac{1}{K_{fl}}} \quad (5.3)$$

Γίνεται η παραδοχή ότι στη δυστημψία συμβάλλει μόνο το εμφανιζόμενο τοίχωμα, με ομοιόμορφη διάτμηση κατά μήκος της οριζόντιας διατομής του (Σχέση 5.4),

$$K_{sh} = \frac{A_w G_w}{h_w} = 1050.4 \text{ kN / mm} \quad (5.4)$$

όπου h_w , A_w και G_w είναι το ύψος, το εμβαδόν της οριζόντιας διατομής και το μέτρο διάτμησης του τοιχώματος, αντίστοιχα.

Το μέτρο διάτμησης του τοιχώματος υπολογίζεται σύμφωνα με τη Σχέση 5.5:

$$G_w = \frac{E_w}{2(1+\nu)} = \frac{29.1}{2(1+0.2)} = 12.12 \text{ GPa} \quad (5.5)$$

Όπου E_w είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος του τοιχώματος και $\nu=0,2$ ο λόγος Poisson για το σκυρόδεμα.

Όσο αφορά την δυσκαμψία θεωρείται ότι συμμετέχει ολόκληρη η διατομή ενός ενιαίου σώματος (τοιχώμα και πλαίσιο) (Σχέση 5.6),

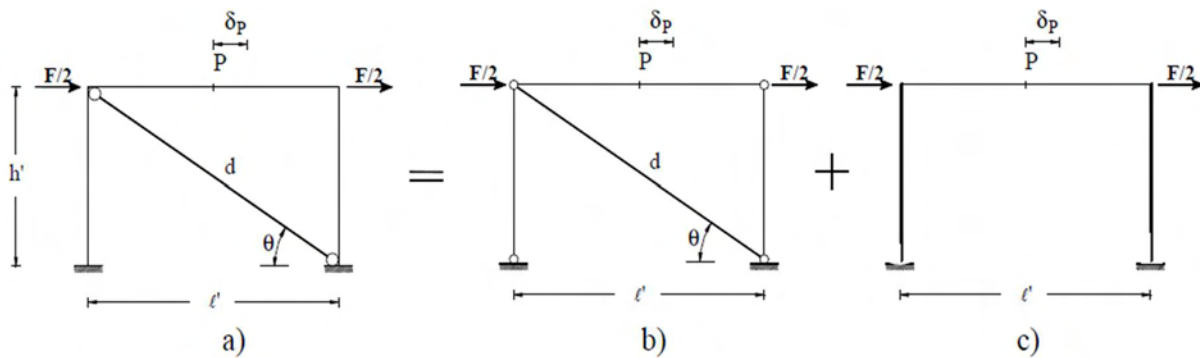
$$K_{fl} = \frac{3 E_c I_g}{h^3} = 2491.3 \text{ kN / mm} \quad (5.6)$$

όπου E_c το μέτρο ελαστικότητας του πιο «αδύναμου» σκυροδέματος (εδώ του τοιχώματος), I_g η ροπή αδράνειας της ισοδύναμης ορθογώνιας διατομής σκυροδέματος και h το ύψος του πλαισίου μέχρι τον κεντροβαρικό άξονα της δοκού.

Τελικά, προκύπτει συνολικά ότι: $K_w = 738.9 \text{ KN/m}$

5.2.2 Μοντέλο ισοδύναμου διαγώνιου θλιπτήρα

Η δυσκαμψία υπολογίζεται ακολουθώντας την μεθοδολογία των Papia et al. (2003). Το μοντέλο πρακτικά αποτελεί την επαλληλία δύο φορέων, ενός δικτυωτού για τη προσομοίωση της λειτουργίας του θλιπτήρα και ενός πλαισιακού, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.1.



Σχήμα 5.1 – Μοντέλο προσομοιώματος εμφανιζόμενου πλαισίου για την εκτίμηση της πλευρικής δυσκαμψίας (Amato et al. 2008).

Η συνεισφορά του δικτυωτού φορέα στη δυσκαμψία δίνεται από τη Σχέση 5.7.

$$D_d = \frac{k_d \cos^2 \theta}{1 + \frac{k_d}{k_c} \sin^2 \theta + \frac{1}{4} \frac{k_d}{k_b} \cos^2 \theta} \quad (5.7)$$

όπου:

$$k_d = \frac{E_d t w}{d}, \text{ η δυστένεια του διαγώνιου θλιπτήρα}$$

$$k_c = \frac{E_f A_c}{h'}, \text{ η δυστένεια των υποστυλωμάτων}$$

$$k_b = \frac{E_f A_b}{\ell'}, \text{ η δυστένεια της δοκού}$$

όπου E_d και E_f είναι τα μέτρα ελαστικότητας του τοιχώματος και του πλαισίου, αντίστοιχα, t το πάχος του εμφανιζόμενου τοιχώματος, w το πλάτος του ισοδύναμου θλιπτήρα, και A_c και A_b τα εμβαδά διατομής των υποστυλωμάτων και της δοκού, αντίστοιχα. Τα μεγέθη θ , h' , ℓ' απεικονίζονται στο Σχ. 5.1.

Η συνεισφορά του αμφίπακτου πλαισίου στη δυσκαμψία δίνεται από τη Σχέση 5.8.

$$D_f = 24 \frac{E_f I_c}{h'^3} \left(1 - 1.5 \left(3 \frac{I_b}{I_c} \frac{h'}{\ell'} + 2 \right)^{-1} \right) \quad (5.8)$$

Όπου I_c , I_b είναι οι ροπές αδράνειας των διατομών των υποστυλωμάτων και της δοκού αντίστοιχα.

Η συνολική δυσκαμψία δίνεται από τη Σχέση 5.9.

$$D_i = D_f + D_d \quad (5.9)$$

Οι ποσότητες στις Σχέσεις 5.7 και 5.8 είναι όλες σταθερές για το δοκίμιο A8, με εξαίρεση το πλάτος του ισοδύναμου θλιπτήρα w , το οποίο εκτιμάται με βάση διάφορα μοντέλα, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

Πλάτος ισοδύναμου θλιπτήρα:

a) KAN.EΠΕ.

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. θεωρεί ως πλάτος του ισοδύναμου θλιπτήρα το $0.15L$ (βλ. παρ. 5.1.1), όπου L είναι το μήκος της διαγωνίου του τοιχώματος.

Επομένως, $w = 0.15 \times 1.5 = 0.225$ m και $D_i = 137.2$ kN/m

b) FEMA 306

Το πλάτος του ισοδύναμου θλιπτήρα προκύπτει με βάση την πρόταση του Mainstone (1971) (βλ. Κεφ. 5.1.2) ως:

$$w = 0.14$$

και επομένως $D_i = 91.6$ kN/mm

c) Holmes (1961)

Κατά τον Holmes (1961), το πλάτος του ισοδύναμου θλιπτήρα είναι το 1/3 του μήκους της διαγωνίου του τοιχώματος.

Επομένως $w = 1.5/3 = 0.50$ m και άρα, $D_i = 250.4$ kN/mm

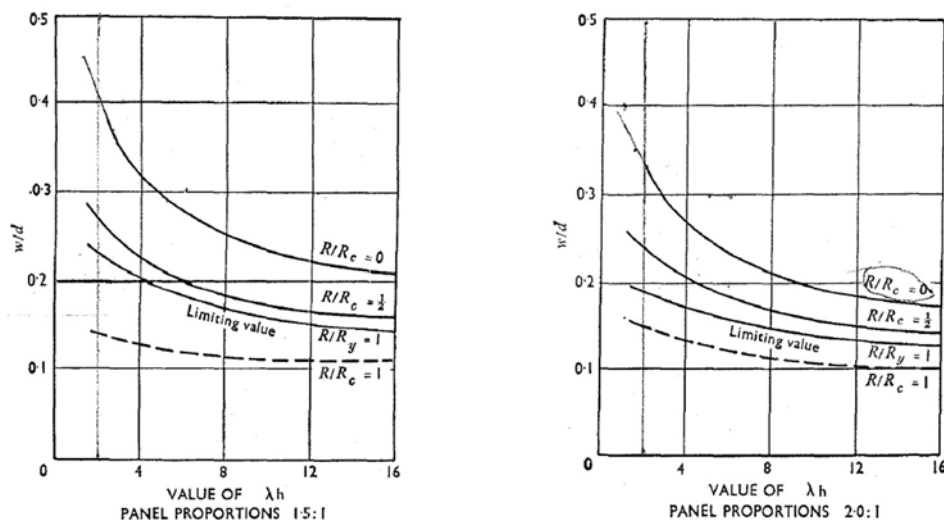
d) Stafford Smith and Carter (1969)

Κατά τους Stafford Smith and Carter (1969), το πλάτος του ισοδύναμου θλιπτήρα μεταβάλλεται σε σχέση με έναν συντελεστή λh , όπου:

$$\lambda h = h \sqrt[4]{\frac{E_{\text{panel}} t}{4 E_f I_c h'}} \sin(2\theta) = 5.16$$

όπου h' είναι το ύψος του τοιχώματος και h το ύψος του πλαισίου μέχρι τον κεντροβαρικό άξονα της δοκού.

Δίνονται καμπύλες, οι οποίες περιγράφουν την σχέση μεταξύ του συντελεστή λh και του λόγου w/d για συγκεκριμένες αναλογίες διαστάσεων εμφανιζόμενου τοιχώματος, όπου d είναι το μήκος του ισοδύναμου θλιπτήρα. Με βάση αυτές τις καμπύλες (Σχ. 5.2) εξάγεται το πλάτος του ισοδύναμου θλιπτήρα w όταν ασκείται φορτίο για πρώτη φορά ($R/R_c = 0$).



Σχήμα 5.2 – Καμπύλες συσχέτισης λόγου w/d με συντελεστή λh για 2 διαφορετικές αναλογίες διαστάσεων φανώματος (1.5:1 και 2.0:1) κατά Stafford Smith and Carter (1969).

Από τις καμπύλες προκύπτει με γραμμική παρεμβολή ότι $w/d = 0.27$ και επομένως,

$$w = 0.40 \text{ m και } D_i = 214.5 \text{ kN/mm}$$

ε) CSA S304.1-04

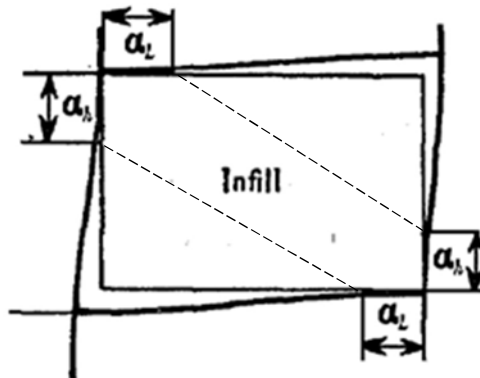
Σύμφωνα με τον Καναδικό Κανονισμό CSA S304.1-04 (2004), το αρχικό πλάτος του ισοδύναμου θλιπτήρα w μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τα εκτιμώμενα κατακόρυφα

και οριζόντια μήκη επαφής του ισοδύναμου θλιπτήρα με το πλαίσιο α_h και α_L (Σχ. 5.3) σύμφωνα με τις Σχέσεις 5.10-5.12.

$$\alpha_h = \frac{\pi}{2} \sqrt[4]{\frac{4 E_f I_{col} h_{inf}}{E_m t_{inf} \sin 2\theta}} = 0.25 \text{ m} \quad (5.10)$$

$$\alpha_L = \pi \sqrt[4]{\frac{4 E_f I_b L_{inf}}{E_m t_{inf} \sin 2\theta}} = 0.78 \text{ m} \quad (5.11)$$

$$w = \sqrt{\alpha_h^2 + \alpha_L^2} = 0.82 \text{ m} \quad (5.12)$$



Σχήμα 5.3 – Σχηματική απεικόνιση των κατακόρυφων και οριζόντιων μηκών επαφής του ισοδύναμου θλιπτήρα με το πλαίσιο, α_h και α_L .

Τελικά, προκύπτει ότι: $D_i = 345.8 \text{ kN/mm}$

Τα αποτελέσματα με βάση τα προαναφερθέντα μοντέλα εκτίμησης αρχικής δυσκαμψίας φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 – Εκτιμήσεις δυσκαμψίας και πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο A8.

	Πειραματικές τιμές	«Shear- beam»	ΚΑΝ.ΕΠΕ.	FEMA 306	Holmes, 1961	Smith & Carter, 1962	CSA S304.1-04
Πλάτος διαγώνιου θλιπτήρα (cm)	-	-	22.5	13.6	50.0	40.3	82.1
Δυσκαμψία/ Δυστμησία (kN/mm)	730 (K_o) 135.3 (K_y) 70.8 (K_{Pmax})	738.9	137.2	91.6	250.4	214.5	345.8

Συγκρίνοντας τις αναλυτικές εκτιμήσεις με την πειραματική τιμή της αρχικής δυσκαμψία/δυστμησίας, K_o , διαπιστώνεται ότι οι εκτιμήσεις που βασίζονται στην προσομοίωση του φατνώματος ως διαγώνιου θλιπτήρα υποεκτιμούν σημαντικά την αρχική δυσκαμψία. Οι αναλυτικές τιμές παρουσιάζουν μεγάλο εύρος μεταξύ τους καθώς εξαρτώνται άμεσα από την τιμή του ισοδύναμου πλάτους του θλιπτήρα, η οποία κυμαίνεται περίπου από 14 έως 82 cm, με τις μικρότερες τιμές πλάτους και αρχικής δυσκαμψίας από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. και τον Αμερικανικό κανονισμό FEMA 306.

Το μοντέλο «shear-beam» των Fiorato et al. (Σχέση 5.3), το οποίο δεν βασίζεται στο μοντέλο του ισοδύναμου θλιπτήρα, έδωσε την πιο ικανοποιητική εκτίμηση για την αρχική δυσκαμψία, με απόκλιση μόλις 1.2 %. Η αμέσως κοντινότερη τιμή είναι η τιμή από το Καναδικό μοντέλο, το οποίο προτείνει και το μεγαλύτερο πλάτος διαγώνιου θλιπτήρα. Η τιμή της αρχικής δυσκαμψίας του Καναδικού μοντέλου είναι περίπου 50% της πειραματικής. Ίδια περίπου δυσκαμψία προβλέπουν τα μοντέλα των Smith & Carter και του Holmes, η οποία είναι περίπου 31% της πειραματικής τιμής.

Η δυσκαμψία του συστήματος εξαρτάται άμεσα από την σχετική επαφή μεταξύ του πλαισίου και του φατνώματος (Paulay and Priestley, 1992), δηλαδή από το βαθμό σύνδεσης αυτών των δύο στοιχείων. Το σύστημα έχει περισσότερο μονολιθική συμπεριφορά και συνεπώς παρουσιάζει υψηλότερη δυσκαμψία όταν το πλαίσιο και τοίχωμα συνδέονται σε μεγαλύτερο βαθμό. Στους πρώτους κύκλους της δοκιμής, οι σχετικές μετακινήσεις στις διεπιφάνειες είναι πολύ μικρές έως μηδενικές (βλ. παρ. 3.5). Συνεπώς, το μοντέλο του ισοδύναμου διαγώνιου

θλιπτήρα αδυνατεί να περιγράψει ικανοποιητικά την αρχική δυσκαμψία καθώς ο διαγώνιος θλιπτήρας προϋποθέτει αποκόλληση του φατνώματος από το πλαίσιο.

Αντίθετα, το μοντέλο των Fiorato et al. θεωρεί ενιαία διατομή για το σύστημα τοιχώματος-πλαισίου, δηλαδή προϋποθέτει μεγάλο βαθμό μονολιθικότητας, οπότε προσομοιώνει σωστά την αρχική κατάσταση του δοκιμίου. Εντούτοις, επισημαίνεται (Mehrabi et al., 1996) ότι γενικά το μοντέλο αυτό υπερεκτιμά την πλευρική δυσκαμψία τέτοιων συστημάτων, λόγω του σχηματισμού ρηγματώσεων στο τοίχωμα και της αποκόλλησης και ολίσθησης στις διεπιφάνειες πλαισίου-φατνώματος ήδη από την έναρξη της καταπόνησης.

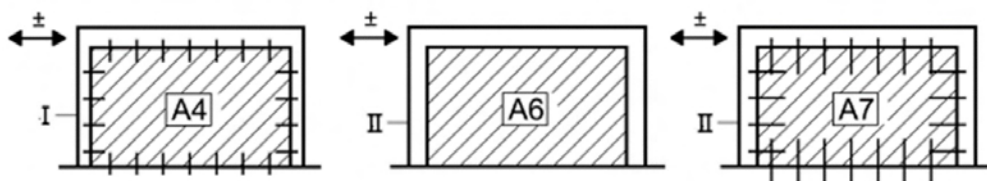
Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι το μοντέλο του διαγώνιου θλιπτήρα είναι πιο κατάλληλο να εκτιμήσει την δυσκαμψία του δοκιμίου σε μεταγενέστερο στάδιο της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, όταν πλέον θα έχουν αναπτυχθεί οι απαιτούμενες σχετικές μετακινήσεις μεταξύ πλαισίου και φατνώματος. Παρατηρείται, ότι η πειραματική επιβατική δυσκαμψία συμβατικής διαρροής εκτιμάται πολύ καλά από το μοντέλο του ΚΑΝ.ΕΠΕ., ενώ η επιβατική δυσκαμψία στο μέγιστο φορτίο εκτιμάται καλύτερα από το μοντέλο της FEMA 306.

Κεφάλαιο 6° : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A8 ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΙΩΝ A4, A6, A7

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων του δοκιμίου A8 με τα πειραματικά αποτελέσματα τριών προηγούμενων δοκιμών εμφανιζόμενων πλαισίων A4, A6 και A7, η συμπεριφορά των οποίων είχε μελετηθεί στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος που χρηματοδοτήθηκε από τον Ο.Α.Σ.Π.

6.1 Χαρακτηριστικά Δοκιμών A4, A6 και A7

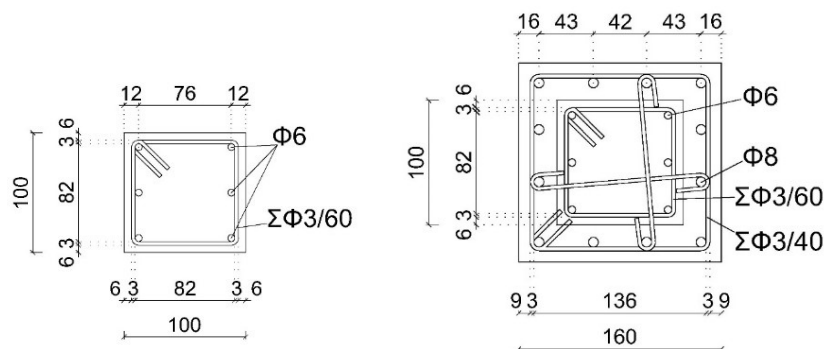
Τα δοκίμια A4, A6 και A7 έχουν, όπως και το A8, εμφανιζόμενο τοίχωμα με λόγο διάτμησης, $h/\ell_w=0.58$. Τα χαρακτηριστικά τους (διαστάσεις και οπλισμός) αντιστοιχούν σε κατασκευές προ του 1985, δηλαδή είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε ψαθυρή αστοχία. Οι εξωτερικές διαστάσεις είναι οι ίδιες με την εξαίρεση ότι στα δοκίμια A6 και A7 πραγματοποιείται μια επιπλέον ενίσχυση. Συγκεκριμένα, τοποθετείται κλειστός μανδύας Ο/Σ γύρω από τα υποστυλώματα και τους κόμβους του υπάρχοντος πλαισίου. Οι μανδύες και το εμφανιζόμενο τοίχωμα σκυροδετούνται σαν ενιαίο σώμα. Συνεπώς, τα δοκίμια A6, A7 ανήκουν στην περίπτωση τοιχωματοποίησης των πλαισίων. Σε όλα τα δοκίμια τηρήθηκαν οι σχέσεις ομοιότητας για την αναλογία 1:3. Στο Σχ. 6.1 φαίνονται οι σχηματικές απεικονίσεις των δοκιμών A4, A6 και A7.



Σχήμα 6.1 – Σχηματικές απεικονίσεις δοκιμών A4, A6 και A7 (υποστυλώματα τύπου II ενισχυμένα με μανδύα).

Τα δοκίμια A4, A6 και A7 εκτός από τους ενισχυτικούς μανδύες στα υποστυλώματα των δοκιμών A6 και A7 έχουν τους ίδιους οπλισμούς με το δοκίμιο A8 καθώςον αφορά τη διάμετρο και την ποιότητα του χάλυβα συμπεριλαμβανομένων και των βλήτρων στις

διεπιφάνειες τοιχώματος-πλαisiού. Μία βασική διαφορά του δοκιμίου A8 με τα άλλα τρία είναι ότι οι κόμβοι των υποστυλωμάτων με τη δοκό του αρχικού πλαισίου ενισχύθηκαν με πύκνωση των συνδετήρων και δύο διαγώνιες ράβδους ανά κόμβο (βλ. παρ. 2.1.1). Επίσης, τοποθετήθηκαν δύο (2) επιπλέον διαμήκειες ράβδοι σε κάθε υποστύλωμα στο επίπεδο του πλαισίου, ενώ στα υποστυλώματα και στη δοκό έχει γίνει πύκνωση των συνδετήρων στις κρίσιμες περιοχές. Στο Σχ. 6.2 φαίνονται τα χαρακτηριστικά του οπλισμού των υποστυλωμάτων των δοκιμών A4, A6 και A7. Η ποιότητα χάλυβα των συνδετήρων του μανδύα είναι η ίδια με τους υπόλοιπους συνδετήρες, ενώ οι διαμήκειες ράβδοι (Ø8) του μανδύα έχουν νευρώσεις και τάση διαρροής 450 MPa.

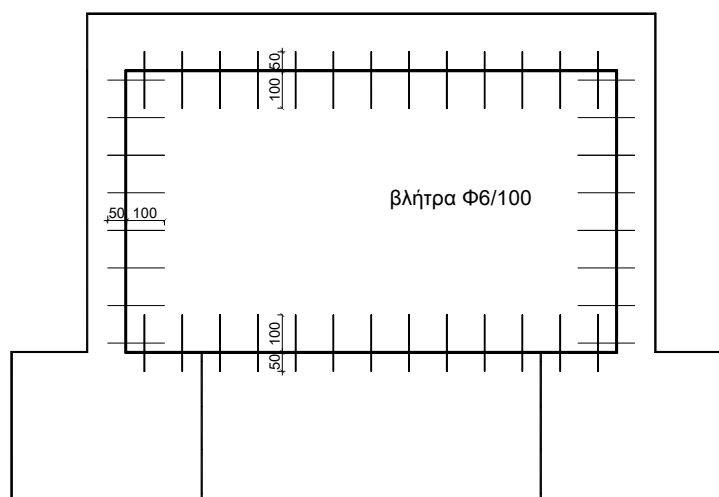


οπλισμός υποστυλώματος δοκιμίου A4

οπλισμός υποστυλώματος τύπου II (δοκιμίες A6, A7)

Σχήμα 6.1 - Χαρακτηριστικά οπλισμού διατομών υποστυλωμάτων δοκιμών A4, A6 και A7.

Όσον αφορά τα βλήτρα (διατμητικοί σύνδεσμοι), το δοκίμιο A7 έχει ακριβώς την ίδια διάταξη και το ίδιο μήκος με το A8. Στο δοκίμιο A6 δεν υπάρχουν βλήτρα, οπότε πρόκειται για προσθήκη απλού «γεμίσματος» του φατνώματος. Στο δοκίμιο A4 έχει τοποθετηθεί ο ίδιος αριθμός βλήτρων περιμετρικά του τοιχώματος με τα δοκίμια A7 και A8, ωστόσο στο δοκίμιο A4 τα βλήτρα ήταν «κοντά» σε αντιδιαστολή με τα «μακριά» βλήτρα των δοκιμών A7 και A8 (βλέπε Σχ. 6.3). Τα «κοντά» βλήτρα στο δοκίμιο A4 έχουν μήκος έμπηξης 50 mm ($8d_b$) στα υποστυλώματα, στη βάση (κάτω) και στη δοκό του πλαισίου (πάνω) μέσω αγκύρωσης με ρητίνη και μήκος αναμονής στο τοίχωμα 100 mm ($16d_b$).



Σχήμα 6.3 - Σχηματική απεικόνιση διάταξης «κοντών» βλήτρων στα δοκίμια A4 και A8.

Στον Πίν. 6.1 παρουσιάζεται η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος πλαισίου και τοιχώματος για όλα τα συγκρινόμενα δοκίμια, συμπεριλαμβανομένου και του A8.

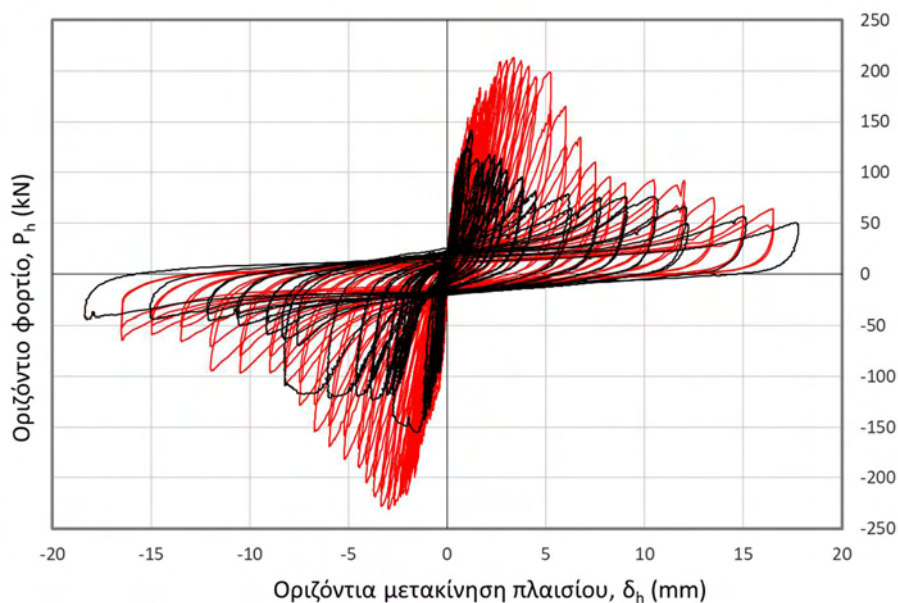
Πίνακας 6.1 - Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος πλαισίου και τοιχώματος για δοκίμια A4, A6, A7 και A8.

Δοκίμιο	ημερομηνία σκυροδέτησης πλαισίου	f_c , κύβου (κυλίνδρου) πλαισίου την ημέρα δοκιμής (MPa)	ημερομηνία σκυροδέτησης τοιχώματος- μανδύα	f_c , κύβου (κυλίνδρου) τοιχώματος- μανδύα την ημέρα δοκιμής (MPa)	ημερομηνία δοκιμής
A4	16/5/11	34,9 (27,9)	1/6/11	40,0 (32,0)	15/9/11
A6	4/11/11	36,9 (29,5)	27/12/11	35,0 (28,0)	8/6/12
A7	15/7/11	35,6 (28,5)	7/1/12	37,4 (29,9)	5/7/12
A8	10/4/14	45,6 (35,6)	11/6/14	26,7 (21,7)	23/2/18

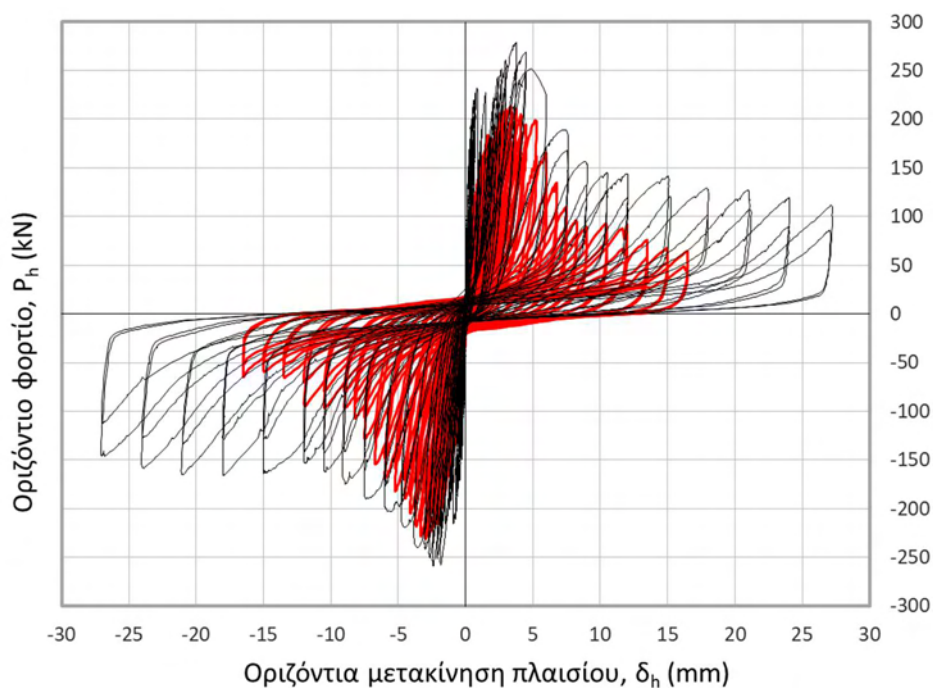
Τονίζεται ότι στο δοκίμιο A8 ακολουθήθηκε το ίδιο ιστορικό ανακυκλιζόμενης φόρτισης με αυτό στα δοκίμια A4, A6 και A7.

6.2 Διαγράμματα φορτίου-μετακίνησης

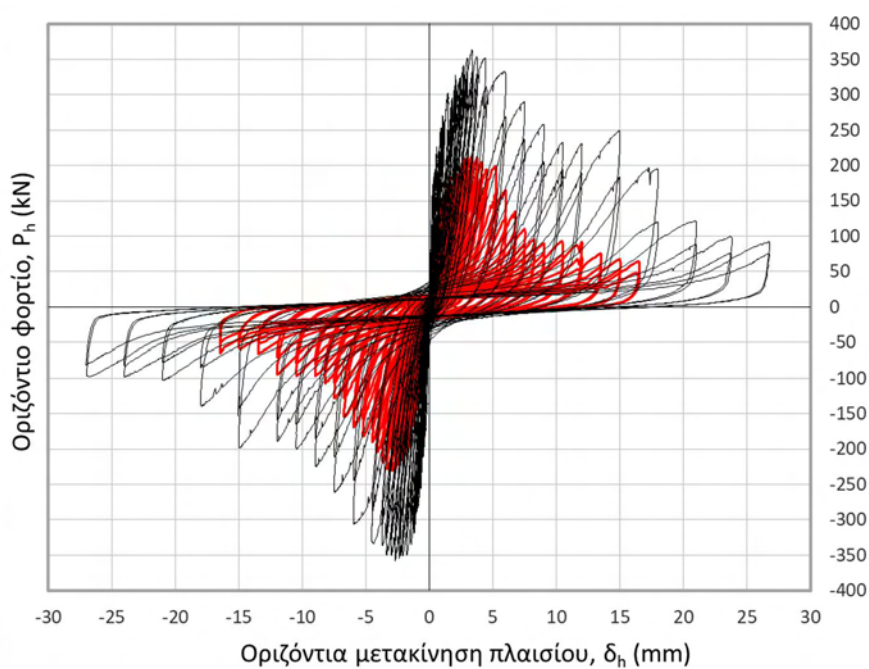
Το διάγραμμα οριζόντιου φορτίου-μετακίνησης του δοκιμίου A8 παρουσιάζεται για σύγκριση με αυτό των δοκιμίων A4, A6 και A7 στα Σχ. 6.4, 6.5 και 6.6, αντίστοιχα. Στο Σχ. 6.7 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι περιβάλλουσες καμπύλες για τον 1^ο κύκλο της θετικής και αρνητικής φόρτισης των διαγραμμάτων φορτίου-μετακίνησης των τεσσάρων δοκιμίων, ενώ στον Πίν. 6.2 περιλαμβάνονται οι τιμές της μέγιστης φέρουσας ικανότητας και των αντίστοιχων οριζόντιων μετακινήσεων για το κάθε δοκίμιο. Στο Σχ. 6.7 περιλαμβάνεται και το διάγραμμα P-δ μονοτονικής φόρτισης ενός γυμνού πλαισίου A1, με τις ίδιες διαστάσεις και οπλισμό με τα παλαιότερα δοκίμια.



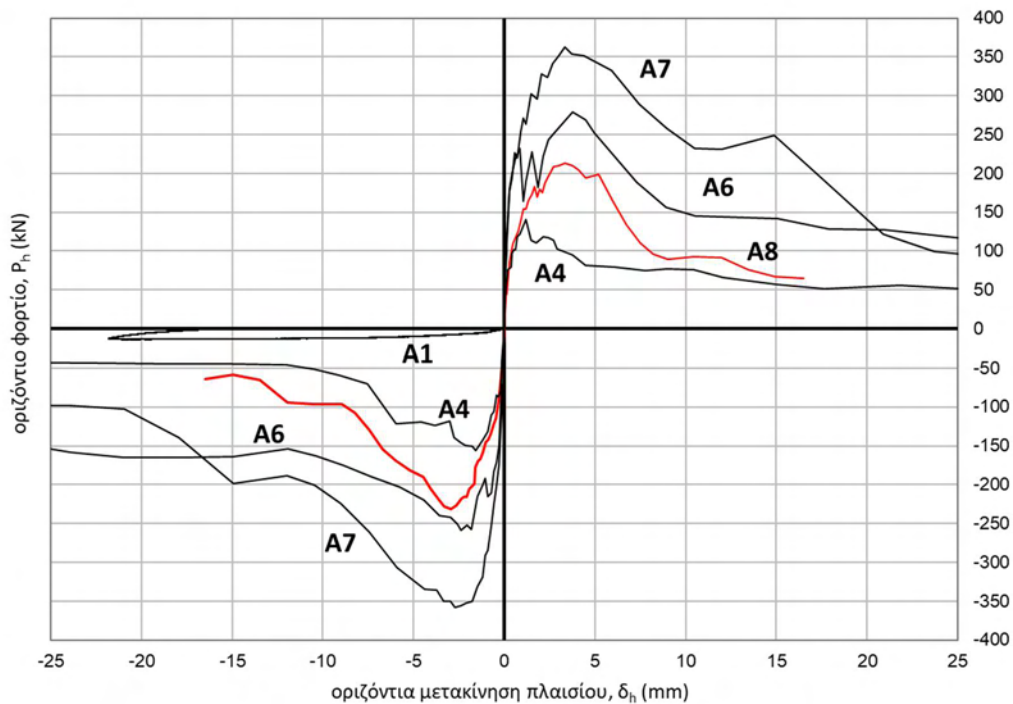
Σχήμα 6.4 – Διάγραμμα οριζόντιου φορτίου-μετακίνησης δοκιμίου A8 (κόκκινη καμπύλη) και A4 (μαύρη καμπύλη).



Σχήμα 6.5 – Διάγραμμα οριζόντιου φορτίου-μετακίνησης δοκιμίου A8 (κόκκινη καμπύλη) και A6 (μαύρη καμπύλη).



Σχήμα 6.6 – Διάγραμμα οριζόντιου φορτίου-μετακίνησης δοκιμίου A8 (κόκκινη καμπύλη) και A7 (μαύρη καμπύλη).



Σχήμα 6.7 – Περιβάλλουσες καμπύλες (1^{ου} κύκλου) θετικής και αρνητικής φόρτισης διαγραμμάτων οριζόντιου φορτίου-μετακίνησης δοκιμίων A4, A6, A7 και A8 (κόκκινη καμπύλη).

Πίνακας 6.2 – Τιμές μέγιστης φέρουσας ικανότητας και αντίστοιχων οριζόντιων μετακινήσεων για συγκρινόμενα δοκίμια.

Δοκίμιο	$P_{h,max} (+)$ (kN)	$P_{h,max} (-)$ (kN)	$P_{h,max}^m$ (kN)	$\delta_{h,Pmax}$ (mm)	$P_{h,max}/P_{h,max(A7)}$
A4	141.15	-155.58	148.36	1.38	0.41
A6	278.65	-259.13	268.89	3.08	0.75
A7	363.05	-357.95	360.50	3.02	1
A8	213.35	-231.03	222.19	3.16	0.62

Παρατηρείται ότι τα δοκίμια A4 και A6 παρουσιάζουν λιγότερο συμμετρική συμπεριφορά για τη θετική και αρνητική κατεύθυνση φόρτισης συγκριτικά με τα δοκίμια A7, A8. Αυτό οφείλεται στην απουσία βλήτρων στο δοκίμιο A6 και στην τοποθέτηση «κοντών» βλήτρων στο δοκίμιο A4. Το δοκίμιο A4 συμπεριφέρεται κυρίως διατμητικά με αστοχία στην διεπιφάνεια τοιχώματος-βάσης (βλ. Κεφάλαιο 6.3). Τα βλήτρα διαθέτουν μεν επαρκή αγκύρωση μήκους $8d_b$ με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (ελάχιστο μήκος αγκύρωσης = $6d_b$), ωστόσο μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, όπου παρατηρείται και η ασυμμετρία στο δοκίμιο A4,

πιθανώς κάποια βλήτρα να μην είναι ικανά να διατηρήσουν την επαρκή σύνδεση του τοιχώματος με το περιβάλλον πλαίσιο και τη βάση. Αυτή η αδυναμία παρουσιάζεται σε διαφορετικό βαθμό στις δύο διευθύνσεις φόρτισης, με αποτέλεσμα την εμφάνιση αυτής της ασυμμετρίας στη συμπεριφορά του δοκιμίου. Στην περίπτωση του δοκιμίου A6, δεν υπάρχει σύνδεση του πλαισίου με το εμφανιζόμενο τοίχωμα, οπότε είναι ευάλωτο σε σημαντικές σχετικές ολισθήσεις και αποκολλήσεις από το περιβάλλον πλαίσιο, οι οποίες αναπτύσσονται σε διαφορετικό βαθμό σε κάθε διεύθυνση φόρτισης.

Στον Πίν. 6.2, διαπιστώνεται ότι τη μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα παρουσιάζουν τα δοκίμια A6 και A7, με το A7 να παρουσιάζει με σημαντική διαφορά τη μεγαλύτερη, επειδή εκτός από την ενίσχυση των υποστυλωμάτων με μανδύα Ο/Σ, τοποθετήθηκαν «μακριά» βλήτρα σε όλες τις διεπιφάνειες. Το δοκίμιο A6 παρά την μη ύπαρξη βλήτρων έχει μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα από τα δοκίμια A4, A8 (75% της αντοχής του A7), λόγω της ενίσχυσης των υποστυλωμάτων με μανδύα. Ακολουθεί το δοκίμιο A8 με φέρουσα ικανότητα ίση με 62% της αντοχής του A7, και τέλος το A4 το οποίο εμφάνισε με διαφορά τη μικρότερη αντοχή (41% αυτής του A7). Η διαφορά αυτή από το δοκίμιο A8 οφείλεται στη τοποθέτηση «κοντών» αντί «μακριών» βλήτρων, αλλά και στη μη πύκνωση των συνδετήρων στις κρίσιμες περιοχές των υποστυλωμάτων, που έγινε στο δοκίμιο A8. Επίσης, ένας άλλος παράγοντας που επηρέασε αρνητικά τη φέρουσα ικανότητα του A4 είναι η υψηλότερη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος του τοιχώματος σε σχέση με το πλαίσιο, γεγονός που κατέστησε το τοίχωμα πιο ισχυρό και μείωσε τη δυνατότητα να παραμορφωθεί, με αποτέλεσμα να πραγματοποιηθεί συγκέντρωση των βλαβών στο πλαίσιο. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι το δοκίμιο A8 με τη προσθήκη των «μακριών» βλήτρων πλησιάζει σε απόκριση το περισσότερο ενισχυμένο δοκίμιο A7. Ωστόσο, παρατηρείται ότι η απομένουσα φέρουσα ικανότητα στο τέλος της δοκιμής είναι πρακτικά η ίδια στα δοκίμια A4 και A8 (40-50 kN), όπως βέβαια και στα δοκίμια A6 και A7 (περίπου 100 kN).

Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα των δοκιμίων A8, A6 και A7 επετεύχθη σε περίπου ίδια οριζόντια μετακίνηση, 3.02 έως 3.16 mm, με εξαίρεση το δοκίμιο A4, του οποίου η αντίστοιχη οριζόντια μετακίνηση είναι λιγότερο από 50% αυτής των άλλων δοκιμίων (1.38 mm).

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ενίσχυση των υποστυλωμάτων με μανδύα φαίνεται ότι είναι πιο αποτελεσματική καθόσον αφορά στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας του ενισχυμένου πλαισίου από την τοποθέτηση διατμητικών συνδέσμων στις διεπιφάνειες στην περίμετρο του τοιχώματος.

6.3 Ρηγμάτωση – Είδος Αστοχίας

α) Κοινά χαρακτηριστικά ρηγμάτωσης των δοκιμίων A4, A6, A7 και A8:

- Οριζόντιες ρωγμές καθ' ύψος των υποστυλωμάτων λόγω της εφελκυστικής δύναμης (βλέπε A8) που αναπτύσσεται στα αντίστοιχα υποστυλώματα κατά την διαδικασία φόρτισης.
- Λοξή ρηγμάτωση στους πάνω κόμβους του πλαισίου.
- Ρωγμές αποκόλλησης στις διεπιφάνειες στην περίμετρο του τοιχώματος.

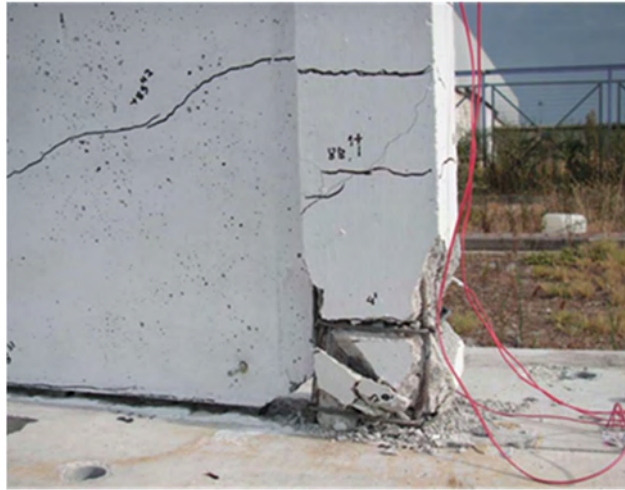
β) Τρόπος αστοχίας δοκιμίων A4, A6 και A7:

Δοκίμιο A4: Παρατηρήθηκε καμπτοδιατμητική αστοχία στη βάση των υποστυλωμάτων σε συνδυασμό με αποδιοργάνωση των αντίστοιχων κάτω γωνιών του τοιχώματος και βλάβη στην κάτω διεπιφάνεια τοιχώματος-βάσης, ενώ υπήρξε ελάχιστη αποκόλληση στην πάνω διεπιφάνεια τοιχώματος-δοκού.

Δοκίμια A6 και A7: Παρατηρήθηκε διατμητική αστοχία στην πάνω παρειά των υποστυλωμάτων με τη δοκό (κάτω από το επίπεδο του επιβαλλόμενου φορτίου) και σημαντική βλάβη στην πάνω διεπιφάνεια (τοιχώματος-δοκού) και τελική θραύση του μανδύα. Για το A7 υπήρξε σημαντική βλάβη στο πάνω τμήμα του τοιχώματος στην περιοχή αγκύρωσης των βλήτρων, και τελική θραύση όλων των βλήτρων στη διεπιφάνεια τοιχώματος-δοκού. Στο δοκίμιο A6 (χωρίς βλήτρα), ενώ η αστοχία ήταν παρόμοια με αυτήν του A7 στην κορυφή των υποστυλωμάτων, η βλάβη στην διεπιφάνεια τοιχώματος-δοκού ήταν περιορισμένη.

Το εμφανιζόμενο τοίχωμα ρηγματώθηκε σημαντικά μόνο στο δοκίμιο A7. Μεμονωμένες ρωγμές εμφανίστηκαν και στο τοίχωμα του δοκιμίου A4, οι οποίες όμως δεν επεκτάθηκαν αρκετά. (Περδικάρης κ.ά., 2012). Στην κάτω διεπιφάνεια του δοκιμίου A4, όπου έλαβε χώρα η διατμητική αστοχία, δεν παρατηρείται κάποια βλάβη στο σκυρόδεμα του τοιχώματος κοντά στην διεπιφάνεια εν αντιθέσει με το δοκίμιο A8 (βλέπε Σχ. 6.9 για το δοκίμιο A4 και Σχ. 3.9 για το δοκίμιο A8). Επίσης, το εύρος αποκόλλησης στην διεπιφάνεια της βάσης κοντά στην αστοχία είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του δοκιμίου A8. Όλα αυτά υποδηλώνουν ότι στην περίπτωση του δοκιμίου A8 υπήρξε πολύ μικρότερη ολίσθηση (εξόλκευση) των βλήτρων και μικρότερη σχετική ολίσθηση στη κάτω διεπιφάνεια με αποτέλεσμα την εξάντληση της μέγιστης φέρουσας ικανότητας των διατμητικών συνδέσμων σε συνδυασμό δράσης βλήτρου και αγκυρίου και τη διαρροή τους. Η συμπεριφορά αυτή

οφείλεται στο ότι τα «μακριά» βλήτρα του δοκιμίου A8 είχαν ικανοποιητικότερο μήκος έμπηξης στη βάση από τα αντίστοιχα στο δοκίμιο A4, ενεργοποιήθηκαν σε μεγαλύτερο βαθμό από τα «κοντά» βλήτρα του δοκιμίου A4 και κατά την ολίσθηση της διεπιφάνειας στη βάση προκάλεσαν τοπική διάρρηξη και συντριβή του σκυροδέματος. Οι ρηγματώσεις και το είδος αστοχίας για τα δοκίμια A4, A6 και A7, απεικονίζονται στα Σχ. 6.8-6.12.



Σχήμα 6.8 – Τελική εικόνα ρηγμάτωσης βάσης υποστυλώματος δοκιμίου A4.



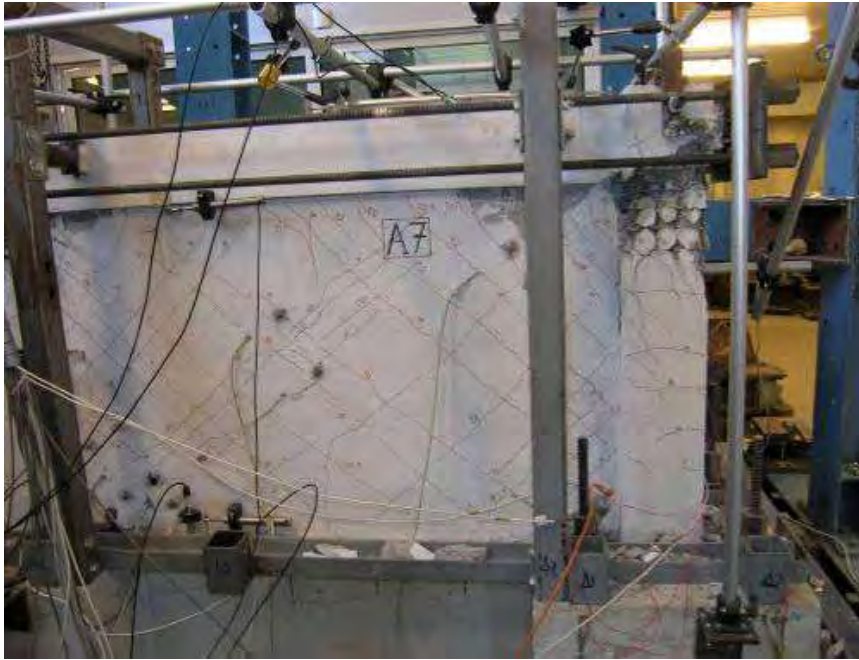
Σχήμα 6.9 – Τελική εικόνα αστοχίας δοκιμίου A4.



Σχήμα 6.10 – Τελική εικόνα αστοχίας υποστυλωμάτων δοκιμίου A6.



Σχήμα 6.11 – Εικόνα αστοχίας πάνω διεπιφάνειας δοκιμίου A7.

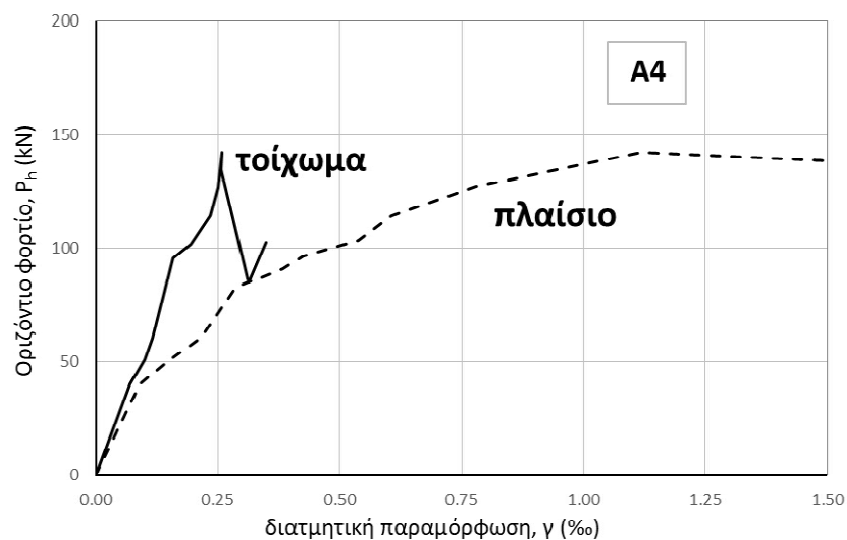


Σχήμα 6.12 – Εικόνα αστοχίας δοκιμίου A7.

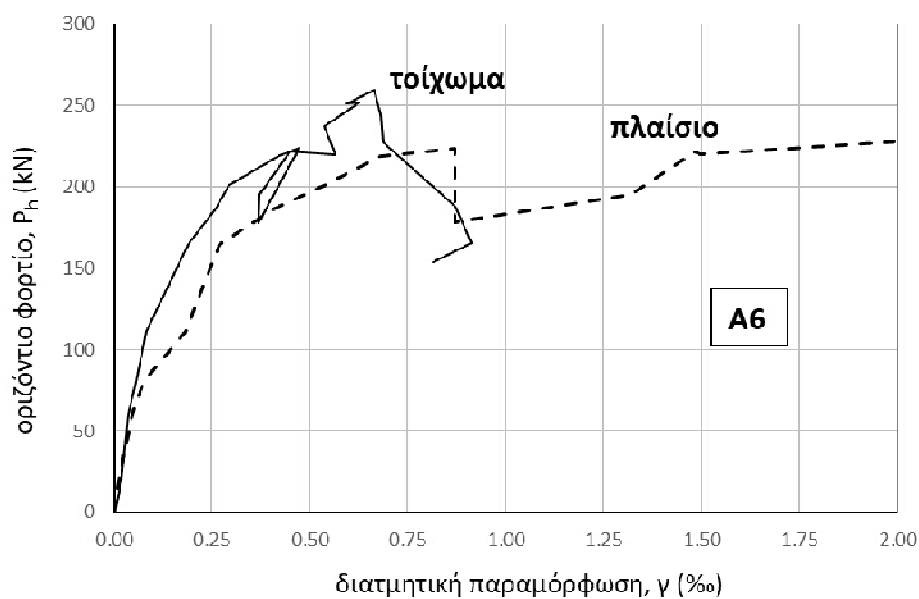
6.4 Διατμητική Παραμόρφωση Πλαισίου και Τοιχώματος

Για τα δοκίμια A4, A6 και A7, τα διαγράμματα του οριζόντιου φορτίου συναρτήσει των διατμητικών (γωνιακών) παραμορφώσεων πλαισίου και τοιχώματος παρουσιάζονται στα Σχ. 6.13 έως 6.17, ενώ τα διαγράμματα των διατμητικών (γωνιακών) παραμορφώσεων συναρτήσει της επιβαλλόμενης σχετικής οριζόντιας μετακίνησης του δοκιμίου, d , στα Σχ. 6.18 έως 6.22. Οι τιμές αντιστοιχούν στις επιβαλλόμενες οριζόντιες μετακινήσεις για τον 1^ο κύκλο φόρτισης. Υπενθυμίζεται ότι η σχετική οριζόντια μετακίνηση, d , είναι ίση με τον λόγο δ_h/h , όπου $h=82,5$ cm.

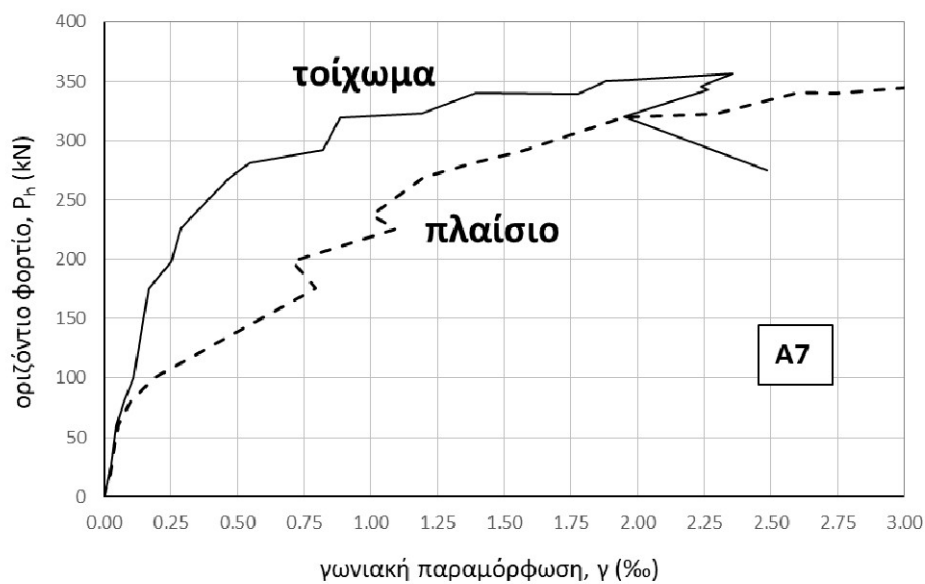
Στα διαγράμματα των Σχ. 6.18 έως 6.20 συμπεριλαμβάνεται για σύγκριση μια «οριακή» διατμητική παραμόρφωση ενός πλαισίου με πλαστικές «αρθρώσεις» με μηδενική συνεργασία με το τοίχωμα, $\gamma_{\text{mech}}=d$.



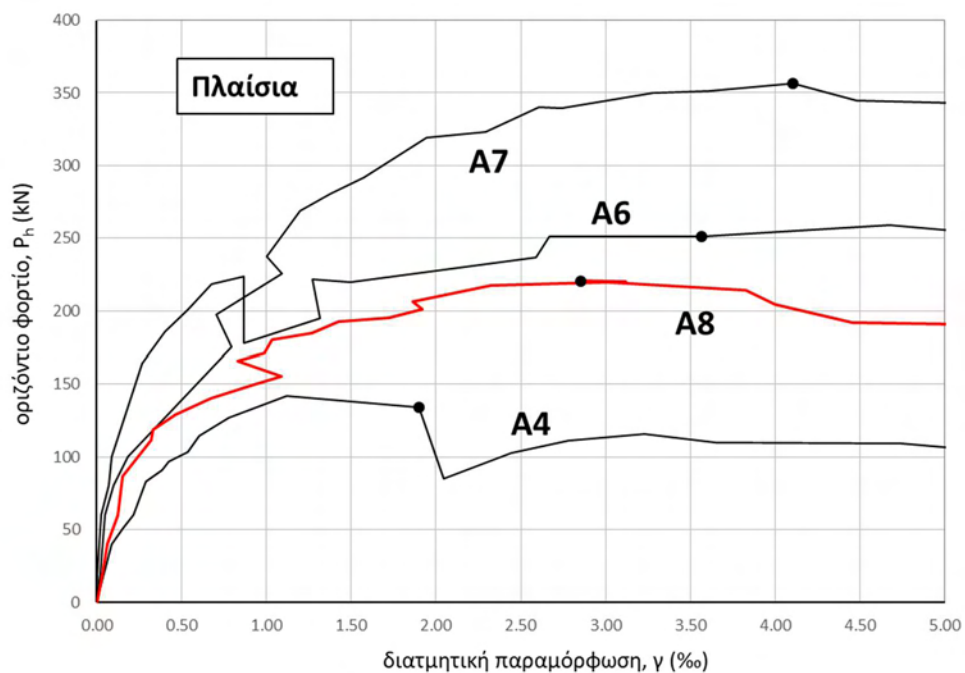
Σχήμα 6.13 - Μέσο επιβαλλόμενο οριζόντιο φορτίο συναρτήσει μέσης διατμητικής παραμόρφωσης τοιχώματος και πλαισίου (διακεκομμένη) για 1^ο κύκλο φόρτισης δοκιμίου A4.



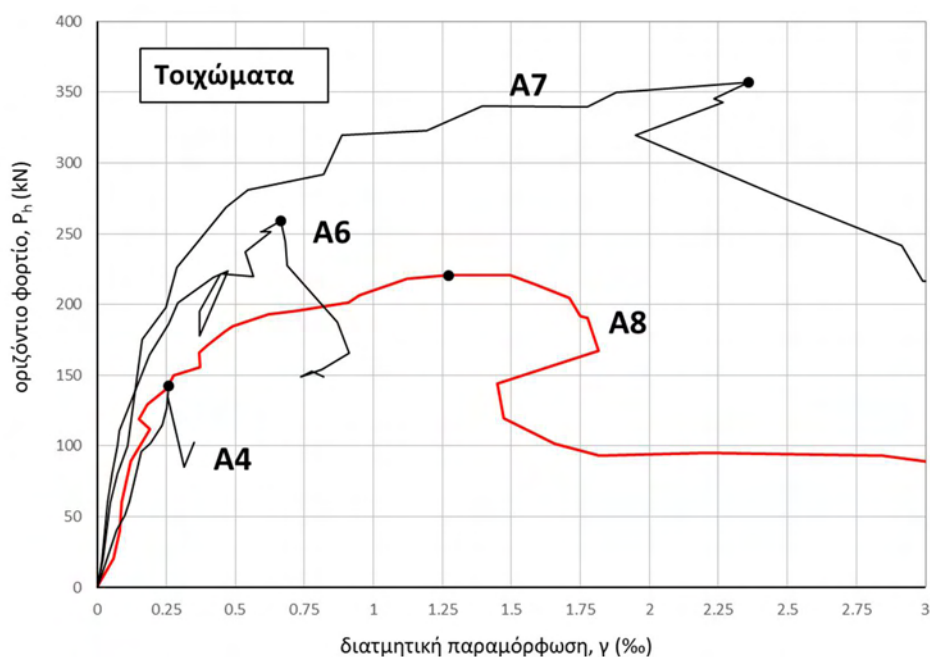
Σχήμα 6.14 - Μέσο επιβαλλόμενο οριζόντιο φορτίο συναρτήσει μέσης διατμητικής παραμόρφωσης τοιχώματος και πλαισίου (διακεκομμένη) για 1^ο κύκλο φόρτισης δοκιμίου A6.



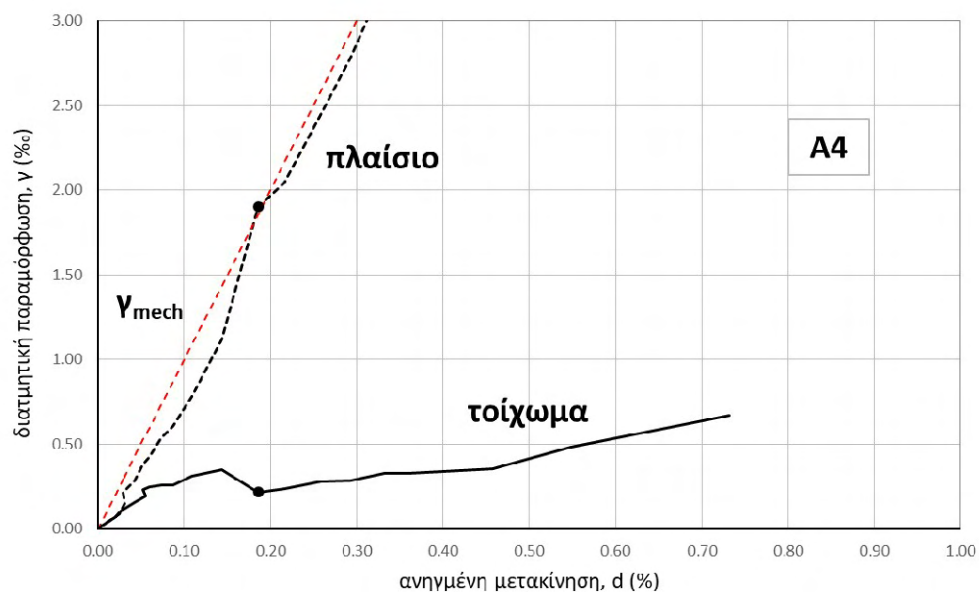
Σχήμα 6.15 - Μέσο επιβαλλόμενο οριζόντιο φορτίο συναρτήσει μέσης διατμητικής παραμόρφωσης τοιχώματος και πλαισίου (διακεκομμένη) για 1^ο κύκλο φόρτισης δοκιμίου A7.



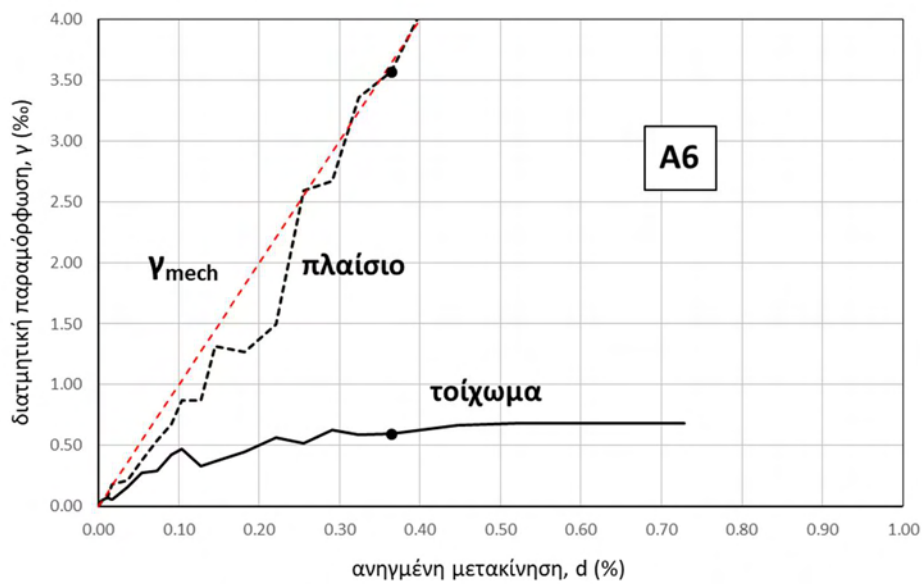
Σχήμα 6.16 - Μέσο επιβαλλόμενο οριζόντιο φορτίο συναρτήσει μέσης διατμητικής παραμόρφωσης πλαισίου για 1^ο κύκλο φόρτισης δοκιμών A4, A6, A7 και A8.



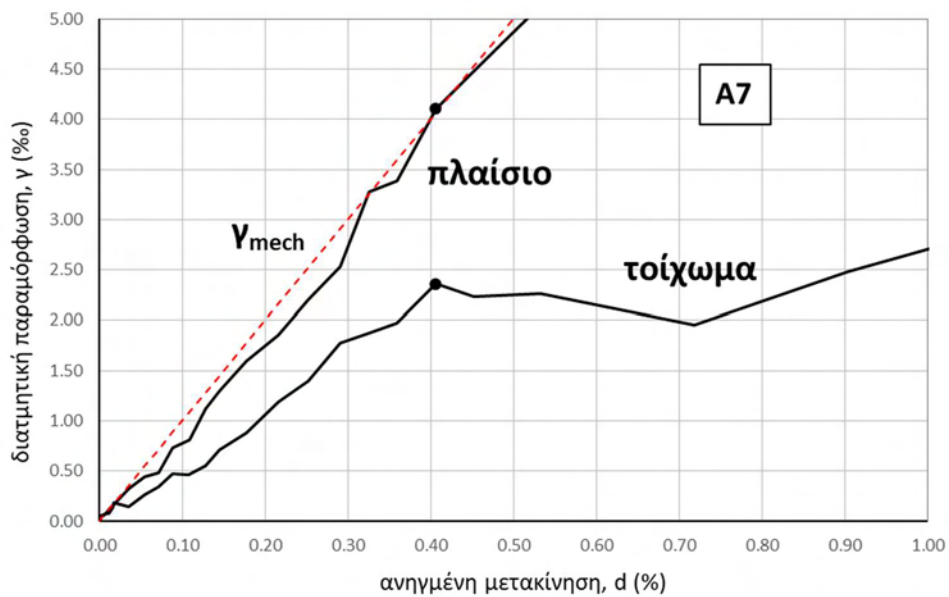
Σχήμα 6.17 - Μέσο επιβαλλόμενο οριζόντιο φορτίο συναρτήσει μέσης διατμητικής παραμόρφωσης τοιχώματος για 1^ο κύκλο φόρτισης δοκιμίων A4, A6, A7 και A8.



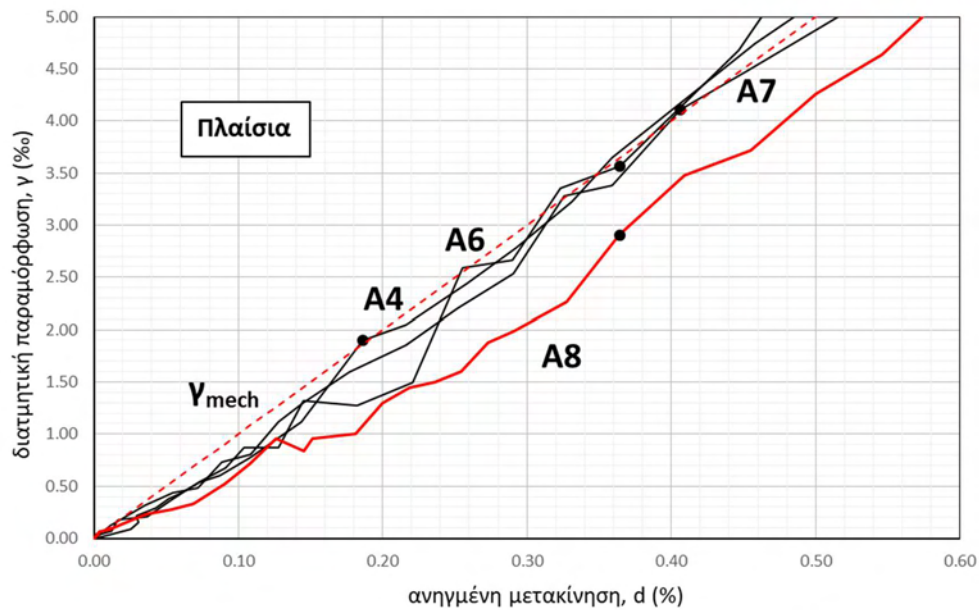
Σχήμα 6.18 - Μέση διατμητική παραμόρφωση, γ (%), τοιχώματος και πλαισίου δοκιμίου A4 συναρτήσει μέσης επιβαλλόμενης οριζόντιας σχετικής μετακίνησης, d (%), για 1^ο κύκλο φόρτισης (σημείο στις καμπύλες υποδεικνύει μέση μέγιστη φέρουσα ικανότητα).



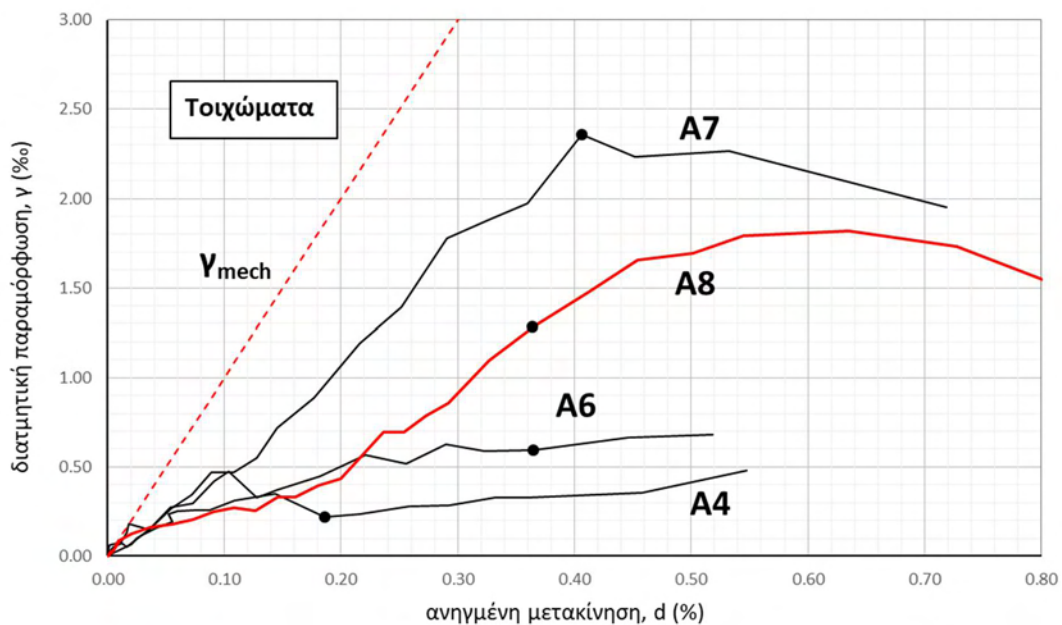
Σχήμα 6.19 - Μέση διατμητική παραμόρφωση, γ (%), τοιχώματος και πλαισίου δοκιμίου A6 συναρτήσει μέσης επιβαλλόμενης οριζόντιας σχετικής μετακίνησης, d (%), για 1^ο κύκλο φόρτισης (σημείο στις καμπύλες υποδεικνύει μέση μέγιστη φέρουσα ικανότητα).



Σχήμα 6.20 - Μέση διατμητική παραμόρφωση, γ (%), τοιχώματος και πλαισίου δοκιμίου A7 συναρτήσει μέσης επιβαλλόμενης οριζόντιας σχετικής μετακίνησης, d (%), για 1^ο κύκλο φόρτισης (σημείο στις καμπύλες υποδεικνύει μέση μέγιστη φέρουσα ικανότητα).



Σχήμα 6.21 - Μέση διατμητική παραμόρφωση, γ (%), πλαισίου δοκιμίων A4, A6, A7 και A8 συναρτήσει μέσης επιβαλλόμενης οριζόντιας σχετικής μετακίνησης, d (%), για 1^ο κύκλο φόρτισης (σημείο στις καμπύλες υποδεικνύει μέση μέγιστη φέρουσα ικανότητα).



Σχήμα 6.22 - Μέση διατμητική παραμόρφωση, γ (%), τοιχώματος δοκιμίων A4, A6, A7 και A8 συναρτήσει μέσης επιβαλλόμενης οριζόντιας σχετικής μετακίνησης, d (%), για 1^ο κύκλο φόρτισης (σημείο στις καμπύλες υποδεικνύει μέση μέγιστη φέρουσα ικανότητα).

Στον Πίν. 6.3 περιλαμβάνονται οι τιμές της μέσης διατμητικής παραμόρφωσης πλαισίου και τοιχώματος στο μέγιστο φορτίο, $\gamma_{p,max}$, καθώς και οι μέσες τιμές του λόγου

οριζόντιου φορτίου προς το μέγιστο φορτίο, $P^m/P_{h,max}$, της παραμόρφωσης του τοιχώματος, $\gamma_{τοιχ}^m$, και της αντίστοιχης οριζόντιας σχετικής μετακίνησης, d^m στο σημείο μέχρι το οποίο παρατηρείται περίπου ίδια διατμητική παραμόρφωση πλαισίου και τοιχώματος.

Πίνακας 6.3 – Τιμές διατμητικής παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο και στο σημείο διαχωρισμού πλαισίου-τοιχώματος.

Δοκίμιο	$\gamma_{P,max}$ (‰)		διαχωρισμός πλαισίου-τοιχώματος		
	πλαίσιο	τοιχώμα	$P^m/P_{h,max}$	$\gamma_{τοιχ}^m$ (‰)	d^m (‰)
A4	1.90	0.25	0.28	0.2	0.03
A6	3.57	0.59	0.31	0.3	0.05
A7	4.10	2.36	0.22	0.2	0.02
A8	2.91	1.28	0.1	0.1	0.02

Στον Πίν. 6.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές της μέσης ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης των θλιβόμενων (ϵ_c) και εφελκόμενων (ϵ_t) διαγωνίων πλαισίου και τοιχώματος στο μέγιστο φορτίο με βάση τις μετρήσεις των wg's για όλα τα δοκίμια A4, A6, A7 και A8.

Πίνακας 6.4 - Μέση ανηγμένη παραμόρφωση στη διεύθυνση της θλιβόμενης (ϵ_c) και εφελκόμενης (ϵ_t) διαγωνίου πλαισίου και τοιχώματος στο μέγιστο φορτίο.

Δοκίμιο	Διαγώνιοι πλαισίου		Διαγώνιοι τοιχώματος	
	θλίψη, ϵ_c (%)	εφελκυσμός, ϵ_t (%)	θλίψη ϵ_c (%)	εφελκυσμός, ϵ_t (%)
A4	-0.04	0.07	-0.02	0.01
A6	-0.11	0.18	-0.01	0.04
A7	-0.14	0.13	-0.06	0.10
A8	-0.10	0.19	-0.02	0.10

Υπενθυμίζεται ότι η ανηγμένη παραμόρφωση ρηγμάτωσης σκυροδέματος σε εφελκυσμό, όπως εκτιμήθηκε στο Κεφ. 4.2, είναι περίπου 0.0075%.

Παρατηρείται ότι οι θλιπτικές παραμορφώσεις που μετρήθηκαν δεν είναι ικανές να καταδείξουν σύνθλιψη στο σκυρόδεμα του τοιχώματος σε κανένα δοκίμιο. Επίσης, με βάση τις εφελκυστικές ανηγμένες παραμορφώσεις, ενώ αρχική ρηγμάτωση στο τοίχωμα προέκυψε σε όλα τα δοκίμια (πολύ οριακή στο δοκίμιο A4), εκτεταμένη ρηγμάτωση υπήρξε μόνο στα δοκίμια A7 και A8.

Παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, ότι η διατμητική παραμόρφωση του πλαισίου σε όλα τα δοκίμια είναι πάντα μεγαλύτερη ή ίση από την αντίστοιχη του τοιχώματος. Σύμφωνα με τα Σχ. 6.13, 6.14 και 6.15, παρατηρείται κάποια «συνεργασία» τοιχώματος και πλαισίου ακόμα και μετά το σημείο που διαφοροποιείται η διατμητική παραμόρφωσή τους στα δοκίμια με τα «μακριά» βλήτρα, η οποία καταδεικνύεται από το χαμηλότερο ρυθμό απομάκρυνσης της καμπύλης του πλαισίου από αυτήν του τοιχώματος στα δοκίμια A7, A8 σε σχέση με τα δοκίμια A4 και A8.

Με βάση τον Πίν. 6.3, παρατηρείται ακόμη ότι η σειρά μεγέθους της διατμητικής παραμόρφωσης του πλαισίου στο μέγιστο φορτίο κάθε δοκιμίου ακολουθεί τη σειρά μεγέθους του μέγιστου φορτίου. Δηλαδή, αυξανόμενη φέρουσα ικανότητα δοκιμίου προϋποθέτει υψηλότερη διατμητική παραμόρφωση του πλαισίου στο μέγιστο φορτίο. Το ίδιο συμβαίνει και για την διατμητική παραμόρφωση του τοιχώματος στο μέγιστο φορτίο, με τη διαφορά ότι για το δοκίμιο A8 παρατηρήθηκε υψηλότερη τιμή απ' ότι για το A6. Αυτό συμβαίνει διότι στο δοκίμιο A6 στο μέγιστο φορτίο εξασφαλίζεται χαμηλότερος βαθμός συνεργασίας μεταξύ τοιχώματος και πλαισίου απ' ότι στο A8 λόγω της μη ύπαρξης διατμητικών συνδέσμων.

Συγκρίνοντας στα Σχήματα 6.18 έως 6.20 τη διατμητική παραμόρφωση του πλαισίου με την «οριακή» καθαρή διατμητική παραμόρφωση, γ_{mech} , με μηδενική συνεργασία με το τοίχωμα, παρατηρείται σε όλα τα δοκίμια ότι οι πειραματικές μετρήσεις για το πλαίσιο είναι πάντα μικρότερες μέχρι περίπου το μέγιστο φορτίο, όπου οι διατμητικές παραμορφώσεις πλαισίου και τοιχώματος παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση. Επομένως, η επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση στα δοκίμια δεν έχει εξ' ολοκλήρου ως αποτέλεσμα την γωνιακή παραμόρφωση πλαισίου και τοιχώματος λόγω καθαρής διάτμησης, αλλά ένα μέρος της εισαγόμενης ενέργειας μετατρέπεται και σε άλλου είδους παραμορφώσεις σε διαφορετικά τμήματα του δοκιμίου λόγω καμπτικής λειτουργίας και σχετικών μετακινήσεων στις διεπιφάνειες.

6.5 Δυσκαμψία/Δυστημσία

Οι τιμές της αρχικής δυσκαμψίας/δυστημσίας, K_o , και της μέσης επιβατικής δυσκαμψίας διαρροής, K_y^m , και επιβατικής δυσκαμψίας στο μέγιστο φορτίο, $K_{P_{max}}^m$, για όλα τα δοκίμια, συμπεριλαμβανομένου και ενός «γυμνού» πλαισίου (δοκίμιο A1) με τις ίδιες διαστάσεις και οπλισμό με τα παλαιότερα δοκίμια, υπό μονοτονική φόρτιση, παρουσιάζονται στον Πίν. 6.5. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται κατά τον ίδιο τρόπο όπως στο δοκίμιο A8 (βλ. κεφ. 3.7). Η τιμή της αρχικής δυσκαμψίας/δυστημσίας για τα δοκίμια A4, A6 και A7 προσδιορίζεται για επιβαλλόμενο φορτίο περίπου από 5 kN έως 15% του P_{max} στον ανιόντα κλάδο του 1^{ου} ημικύκλου φόρτισης.

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. (§7.1.2.2), για την ανάλυση υπαρχουσών κατασκευών προτείνει τη χρήση μιας οιονεί ελαστικής δυσκαμψίας $K = F_y/\delta_y$, όπου F_y είναι η αντίσταση διαρροής ίση με την οριακή αντίσταση για τον κρίσιμο τρόπο αστοχίας. Με βάση τον κανονισμό, ως άνω όριο μπορεί να ληφθεί η τιμή $0.25K_o$ (βλέπε Πίν. 6.5).

Πίνακας 6.5 – Μέση αρχική δυσκαμψία/δυστημσία και επιβατική δυσκαμψία στη διαρροή και μέγιστο φορτίο για όλα τα συγκρινόμενα δοκίμια.

Δοκίμιο	K_o (kNmm)	K_y^m (kNmm)	$K_{P_{max}}^m$ (kNmm)	$K_{\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ.}}$ (=0.25 K_o) (kNmm)
A4	747	169	109	187
A6	1157	222	91	289
A7	1180	283	121	295
A8	730	135	71	183
A1	11	2	1	3

Παρατηρείται ότι η ενίσχυση των υποστυλωμάτων και των κόμβων στα δοκίμια A6 και A7 με κλειστό μανδύα Ο/Σ, μονολιθικά συνδεδεμένο με το εμφανιζόμενο τοίχωμα, οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αρχικής δυσκαμψίας. Η μέση αρχική δυσκαμψία των δοκιμίων A6 και A7 είναι περίπου 1.6 φορές εκείνης των δοκιμίων A4 και A8. Παρατηρείται ότι υπήρξε παρόμοια αυξημένη μέση αρχική δυσκαμψία στην περίπτωση του δοκιμίου A6 σε σχέση με το A7 παρά την πλήρη απουσία συνδέσμων στις διεπιφάνειες, το οποίο υποδεικνύει ότι η αύξηση της περίσφιγξης και της δυσκαμψίας των υποστυλωμάτων με τον μανδύα Ο/Σ, που

περιλαμβάνει και τους αντίστοιχους κόμβους με τη δοκό, και η μονολιθική σύνδεση του τοιχώματος με τον μανδύα ενίσχυσης έχει σημαντικά μεγαλύτερη επιρροή στην αύξηση της αρχικής δυσκαμψίας σε σύγκριση με την προσθήκη διατμητικών συνδέσμων στις διεπιφάνειες.

Σε σχέση με το δοκίμιο A4, το δοκίμιο A8 διαθέτοντας αυξημένη μεν περίσφιγξη των υποστυλωμάτων και των κόμβων του πλαισίου, αλλά «ασθενέστερο» τοίχωμα, παρουσιάζει πρακτικά την ίδια μέση αρχική δυσκαμψία.

Βέβαια όσον αφορά την μέση επιβατική δυσκαμψία στο μέγιστο φορτίο, K_{Pmax}^m , η τοποθέτηση των συνδέσμων στην περίμετρο του φατώματος του δοκιμίου A7 είχε σημαντική επιρροή καθώς η τιμή της δυσκαμψίας είναι περίπου 33% μεγαλύτερη απ' αυτήν του δοκιμίου A6, έχοντας βέβαια υπόψη ότι τα δύο δοκίμια παρουσίασαν παρόμοια μέση οριζόντια μετακίνηση στο μέγιστο φορτίο.

Η μέση επιβατική δυσκαμψία στη διαρροή, K_y^m , για τα δοκίμια A4 και A8 (χωρίς ενίσχυση των υποστυλωμάτων) ήταν 23% και 19% της αντίστοιχης μέσης αρχικής δυσκαμψίας, K_0 , και για τα δοκίμια A6 και A7 (με ενίσχυση των υποστυλωμάτων) ήταν 19% και 24%, αντίστοιχα. Άρα, και στα τέσσερα δοκίμια που συγκρίθηκαν ανεξάρτητα της φέρουσας ικανότητας και της αρχικής δυσκαμψίας του δοκιμίου, παρατηρείται ότι η μέση επιβατική δυσκαμψία στη διαρροή είναι περίπου 21% της αντίστοιχης αρχικής δυσκαμψίας. Αξιοσημείωτο είναι ότι το ποσοστό αυτό είναι παρόμοιο με το άνω όριο του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 25% για την οιονεί ελαστική δυσκαμψία.

Η μέση επιβατική δυσκαμψία στο μέγιστο φορτίο, K_{Pmax}^m , για τα δοκίμια A4 και A8 (χωρίς ενίσχυση των υποστυλωμάτων) ήταν 15% και 10% της αντίστοιχης αρχικής δυσκαμψίας, K_0 , ενώ για τα δοκίμια A6 και A7 (με ενίσχυση των υποστυλωμάτων) ήταν 8% και 10%, αντίστοιχα. Η διαφορά αυτή του A4 οφείλεται στην αστοχία του δοκιμίου σε μικρότερη επιβαλλόμενη μετακίνηση σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια.

Τέλος, παρατηρείται ότι οι τιμές της δυσκαμψίας στην συμβατική διαρροή για τα δοκίμια της παρούσας έρευνας βρέθηκαν αρκετά κοντά στο άνω όριο της προτεινόμενης τιμής από τον ΚΑΝΕΠΕ. Αυτό συμβαίνει σε μικρότερο βαθμό στα δοκίμια A6 και A8. Συνεπώς, με βάση τις τελευταίες παραγράφους, διαπιστώνουμε ότι η ελαστική δυσκαμψία που υιοθετείται για ανάλυση υφιστάμενων κατασκευών πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 10% και 22% της αρχικής δυσκαμψίας K_0 .

6.6 Πλαστιμότητα

Η τιμές της μέσης συμβατικής οριζόντιας μετακίνησης διαρροής, δ_y^m , και συμβατικής αστοχίας, δ_u^m , και του μέσου δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων, μ_δ^m , για τα δοκίμια A4, A6, A7 και A8 περιλαμβάνονται στον Πίνακα 6.6. Στον ίδιο πίνακα συμπεριλαμβάνεται και το «γυμνό» πλαίσιο A1.

Πίνακας 6.6 - Μέση συμβατική οριζόντια μετακίνηση διαρροής, δ_y^m , και αστοχίας, δ_u^m , και μέσος δείκτης πλαστιμότητας μετακινήσεων, μ_δ^m , για όλα τα συγκρινόμενα δοκίμια.

Δοκίμιο	δ_y^m (mm)	δ_u^m (mm)	μ_δ^m
A4	0.88	1.81	2.0
A6	1.22	3.89	3.1
A7	1.31	4.25	3.3
A8	1.64	4.07	2.5
A1	8.28	21.02	2.7

Είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. (παρ. 7.1.2.6) λαμβάνει το όριο μεταξύ πλαστιμής και ψαθυρής συμπεριφοράς ενός στοιχείου Ο/Σ, συμβατικά ίσο με 2.0. Για την περίπτωση προσθήκης απλών γεμισμάτων (παρ. 8.5.2) γίνεται αναφορά ότι τα συστήματα αυτά αντιμετωπίζονται ως ψαθυρά.

Το δοκίμιο A4 παρουσίασε την χαμηλότερη πλαστιμότητα ($\mu_\delta^m = 2$) σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια A6, A7 και A8.

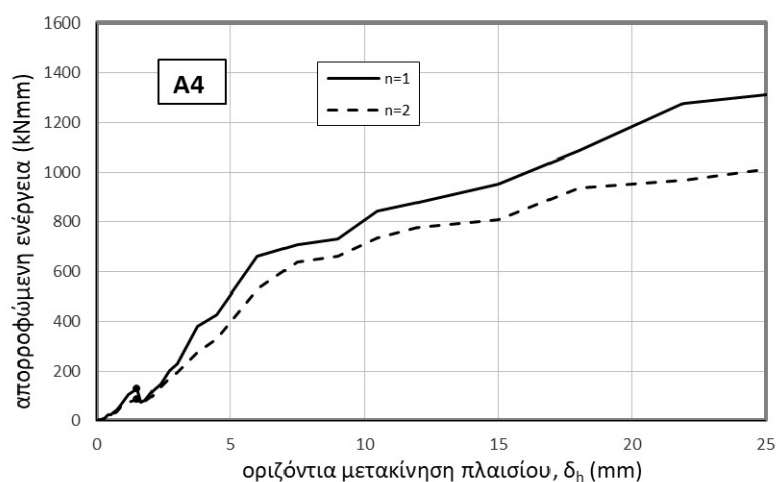
Τα δοκίμια A6 και A7, των οποίων τα υποστυλώματα και οι πάνω κόμβοι ενισχύθηκαν με κλειστό μανδύα Ο/Σ, παρουσίασαν παρόμοια πλαστιμότητα ($\mu_\delta^m = 3.1 - 3.3$, με απόκλιση μόλις 6.5%) και την υψηλότερη σε σχέση με τα δοκίμια A8 και A4. Αυτή η διαφορά αποδίδεται στην αυξημένη περίσφιγξη και δυσκαμψία των αρχικών υποστυλωμάτων και των αντίστοιχων κόμβων του πλαισίου λόγω του μανδύα, αλλά και στη μονολιθική σύνδεση του τοιχώματος με τους μανδύες ενίσχυσης των υποστυλωμάτων, η οποία βοηθάει στη μείωση των σχετικών μετακινήσεων τοιχώματος-πλαισίου και αποτρέπει την απότομη αποκόλληση του τοιχώματος και την ξαφνική αστοχία των κόμβων, με αποτέλεσμα η πτώση της απόκρισης του δοκιμίου να είναι ομαλότερη σε σχέση με το δοκίμιο A4.

Η παρόμοια τιμή του μέσου δείκτη πλαστιμότητας στα δοκίμια A6 και A7 υποδηλώνει ότι η ενίσχυση των υποστυλωμάτων του πλαισίου με μανδύα Ο/Σ συμβάλλει περισσότερο στην αύξηση της πλαστιμότητας από την τοποθέτηση διατμητικών συνδέσμων στις διεπιφάνειες περιμετρικά του τοιχώματος. Το δοκίμιο A8 επέδειξε χαμηλότερη πλαστιμότητα από τα A6 και A7, αλλά μεγαλύτερη από το δοκίμιο A4 (κατά 25%), γεγονός που πρέπει να αποδοθεί στην καλύτερη περίσφιγξη των αρχικών υποστυλωμάτων και κόμβων, την τοποθέτηση «μακριών» συνδέσμων στις διεπιφάνειες έναντι των «κοντών» συνδέσμων του δοκιμίου A4 και στη χαμηλότερη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος του τοιχώματος.

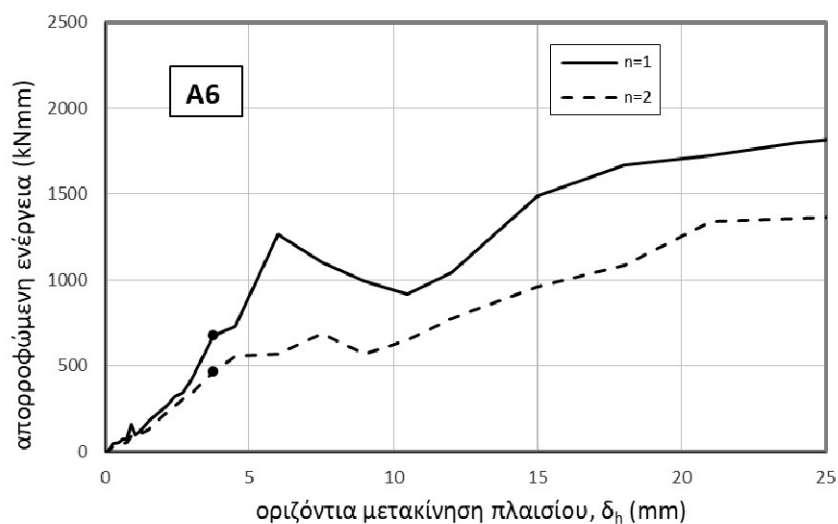
Διαπιστώνεται ότι όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια (A4, A6, A7 και A8), με δείκτες πλαστιμότητας $\mu_s^m \geq 2$, επέδειξαν πλαστιμότητα μεγαλύτερη από την αναμενόμενη με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

6.7 Απορρόφηση ενέργειας

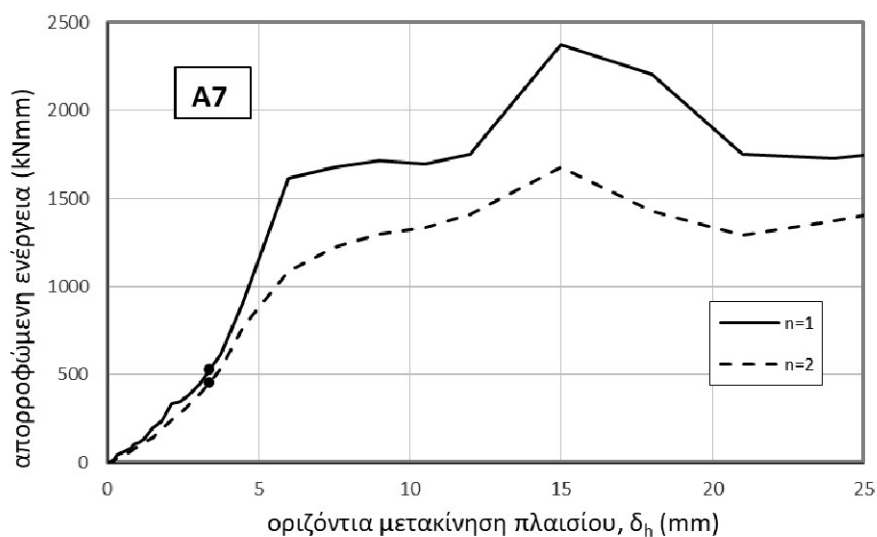
Στα Σχ. 6.23 έως 6.26 παρουσιάζεται η απορρόφηση ενέργειας των δοκιμίων A4, A6 και A7 σε διαγράμματα απορρόφησης ενέργειας συναρτήσει της επιβαλλόμενης οριζόντιας μετακίνησης για τον 1^ο και 2^ο κύκλο φόρτισης ($n=1, 2$). Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και για τα τέσσερα δοκίμια για τον 1^ο κύκλο φόρτισης ($n=1$) μπορεί να συγκριθεί στα διαγράμματα του Σχ. 6.27. Στο Σχ. 6.26 συμπεριλαμβάνεται επίσης η ενέργεια που απορροφά το γυμνό πλαίσιο A1, με υπόθεση θετικού ημικύκλου ίδιου με τον αρνητικό (της μονοτονικής φόρτισης).



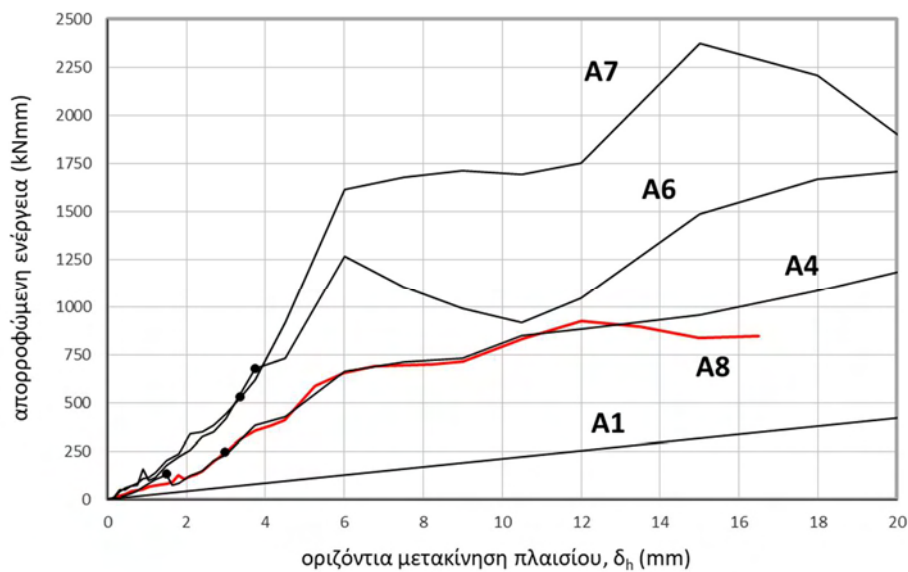
Σχήμα 6.23 - Ενέργεια απορρόφησης δοκιμίου A4 σε κάθε επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση για 1^ο και 2^ο κύκλο φόρτισης.



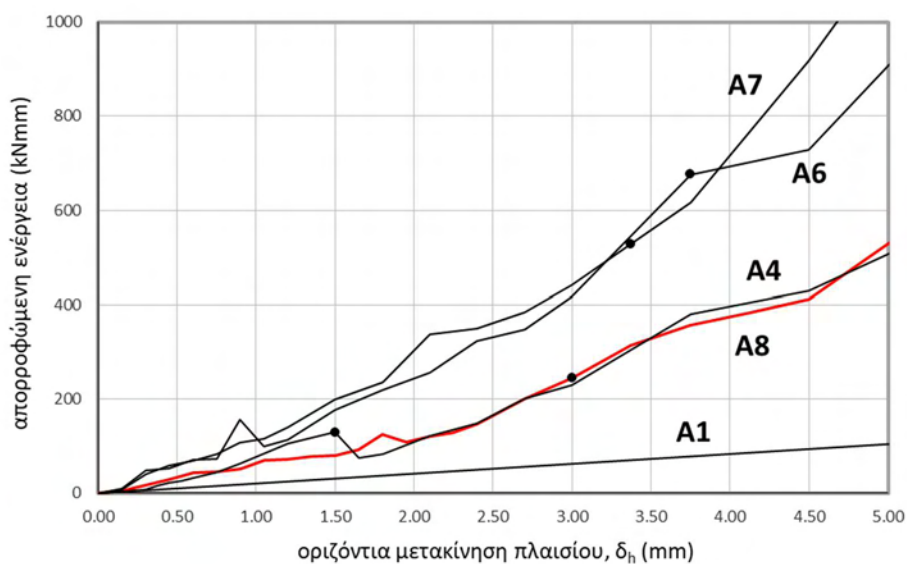
Σχήμα 6.24 - Ενέργεια απορρόφησης δοκιμίου A6 σε κάθε επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση για 1^ο και 2^ο κύκλο φόρτισης.



Σχήμα 6.25 - Ενέργεια απορρόφησης δοκιμίου A7 σε κάθε επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση για 1^ο και 2^ο κύκλο φόρτισης.

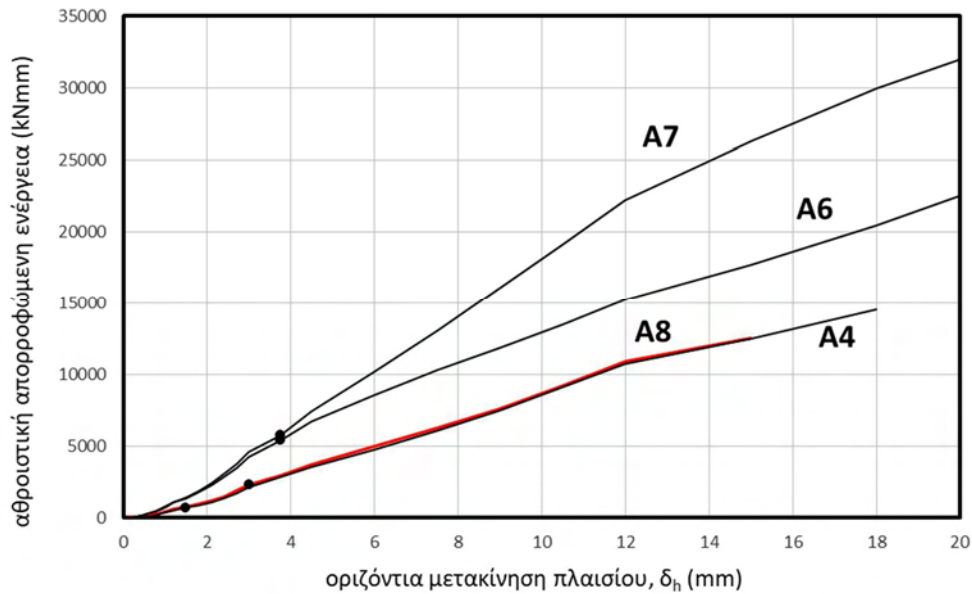


(α) $0 \leq \delta_h \leq 20 \text{ mm}$



(β) $0 \leq \delta_h \leq 5 \text{ mm}$

Σχήμα 6.26 - Ενέργεια απορρόφησης όλων των δοκιμών σε κάθε επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση για 1^ο κύκλο φόρτισης.

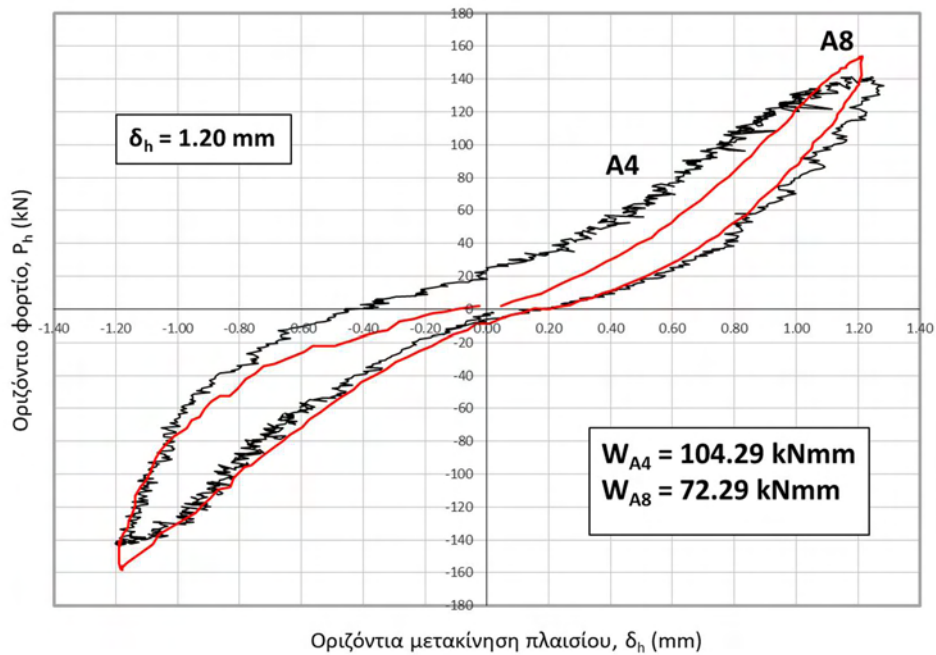


Σχήμα 6.27 – Αθροιστική ενέργεια απορρόφησης στα συγκρινόμενα δοκίμια σε κάθε επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση.

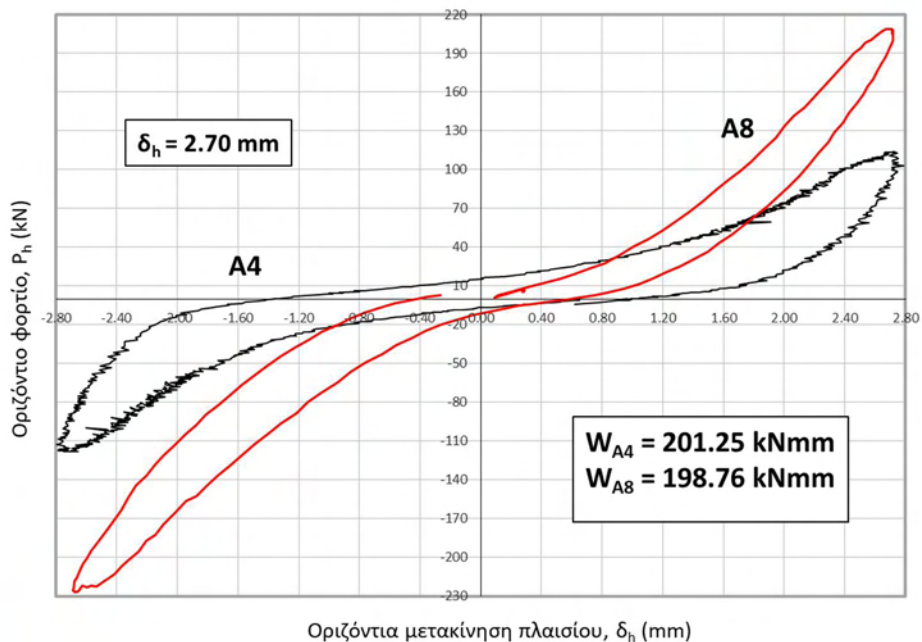
Παρατηρείται ότι τα δοκίμια A4 και A8 απορροφούν σχεδόν την ίδια ενέργεια σε κάθε επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση καθ' όλη τη διάρκεια της καταπόνησής τους με εκπληκτική ακρίβεια, γεγονός που υποδηλώνει ότι η διαφορά στο μήκος των διατμητικών συνδέσμων σε συνδυασμό με τον αυξημένο οπλισμό περίσφιγξης και κόμβων του αρχικού πλαισίου στο δοκίμιο A8 δεν οδηγεί σε υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας, παρ' όλο που οδηγεί σε μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα.

Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί μελετώντας τους υστερητικούς βρόχους του διαγράμματος φορτίου-μετακίνησης των δοκιμίων A4 και A8 σε οριζόντια μετακίνηση $\delta_h = 2.7$ mm (Σχ. 6.29), όπου παρατηρείται ότι το δοκίμιο A8 επιστρατεύεται την φέρουσα ικανότητά του σε κάθε επιβαλλόμενη μετακίνηση σχηματίζοντας πιο συμπίεσμένους υστερητικούς βρόχους από το A4. Από την άλλη, το δοκίμιο A4 για την μετακίνηση αυτή ευρίσκεται στον φθίνοντα κλάδο απόκρισης σε μεταγενέστερη φάση απόκρισης (η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του A4 επιτυγχάνεται σε μικρότερη μετακίνηση, $\delta_h = 1.38$ mm, βλ. Σχ. 6.7), οπότε έχει μεγαλύτερες απομένουσες παραμορφώσεις και οι βρόχοι του είναι πιο «παχείς», με αποτέλεσμα οι τιμές των εμβαδών εν τέλει να ταυτίζονται. Επίσης, δίνονται οι βρόχοι σε οριζόντια μετακίνηση $\delta_h = 1.2$ mm (Σχ. 6.28), στην οποία περίπου το δοκίμιο A4 επιτυγχάνει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητά του. Παρατηρείται ότι τώρα ο βρόχος του δοκιμίου A8 δεν έχει

προλάβει να αυξηθεί σε εμβαδό αρκετά σε σχέση με του A4, με αποτέλεσμα το A8 να απορροφά λιγότερη ενέργεια σε αυτό το κύκλο, όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.26.



Σχήμα 6.28 - Υστερητικοί βρόχοι διαγράμματος φορτίου-μετακίνησης δοκιμίων A4 και A8 σε οριζόντια μετακίνηση $\delta_h = 1.20 \text{ mm}$.



Σχήμα 6.29 - Υστερητικοί βρόχοι διαγράμματος φορτίου-μετακίνησης των δοκιμίων A4 και A8 σε οριζόντια μετακίνηση $\delta_h = 2.70 \text{ mm}$.

Ομοίως, τα δοκίμια A6 και A7 παρουσιάζουν περίπου την ίδια περίπου απορρόφηση ενέργειας μέχρι τη μετακίνηση που αντιστοιχεί στην συμβατική αστοχία (4.25 mm για το δοκίμιο A7, η οποία είναι και η μεγαλύτερη απ' όλα τα δοκίμια). Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι η ύπαρξη ενίσχυσης των υποστυλωμάτων με μανδύες μονολιθικά σκυροδετημένους με το τοίχωμα είναι πολύ πιο καθοριστική στην ενέργεια από την ύπαρξη ή όχι διατμητικών συνδέσμων της συγκεκριμένης διαμέτρου ($\varnothing 6$) και συγκεκριμένου αριθμού (ανά 10 cm) στην περίμετρο του φατνώματος.

Επίσης, το δοκίμιο A6 απορροφά συνολικά λιγότερη ενέργεια από το A7, διότι λόγω έλλειψης βλήτρων, καθίσταται πιο εύκολη η αποκόλληση και ολίσθηση του τοιχώματος σε σχέση με το περιβάλλον πλαίσιο, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο μέρος της εισαγόμενης ενέργειας να αναλώνεται στις κινήσεις ολίσθησης και αποκόλλησης.

Εν τέλει, διαπιστώνεται ότι η επίδραση της τοιχωματοποίησης με μανδύες στην αύξηση της απορροφώμενης ενέργειας είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την παρουσία των βλήτρων στις διεπιφάνειες, δεδομένου ότι η συνολικά απορροφώμενη ενέργεια στα δοκίμια A6, A7 είναι σχεδόν διπλάσια από αυτή στα δοκίμια A4, A8.

Κεφάλαιο 7^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος του παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να διερευνηθεί η συμπεριφορά δοκιμίου πλαισίου Ο/Σ με ενισχυμένους κόμβους (δοκίμιο Α8), εμφανιζόμενο με τοίχωμα Ο/Σ σχετικά χαμηλής αντοχής, συνδεδεμένο με το πλαίσιο μέσω διατμητικών συνδέσμων στις διεπιφάνειες της περιμέτρου του και καταπονούμενο σε ανακυκλιζόμενη οριζόντια φόρτιση (προσομοίωση σεισμικής διέγερσης). Επιπλέον, εξετάστηκε η δυνατότητα εκτίμησης των χαρακτηριστικών της συμπεριφοράς του με βάση αναλυτικά μοντέλα άλλων ερευνητών και κανονισμών (ΚΑΝ.ΕΠΕ.). Τέλος, η συμπεριφορά του συγκρίθηκε με αυτήν τριών προηγούμενων δοκιμών με παρόμοια γεωμετρία και οπλισμό του ίδιου ερευνητικού προγράμματος.

Το δοκίμιο Α8 παρουσίασε έντονη διατμητική συμπεριφορά, η οποία καταδεικνύεται και από την διατμητικού τύπου αστοχία στη βάση των υποστυλωμάτων (με κάποια καμπτική βλάβη σε μικρότερο βαθμό), καθώς και στη κάτω διεπιφάνεια του τοιχώματος με τη βάση αγκύρωσης. Στην κάτω διεπιφάνεια, μετά την επίτευξη της μέγιστης φέρουσας ικανότητας λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης διαπιστώθηκε και πλήρης θραύση κάποιων βλήτρων και συντριβή (σύνθλιψη) τμημάτων του κάτω μέρους του τοιχώματος.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις των sg 's και των wg 's στο τοίχωμα διαπιστώθηκε ότι μέχρι την αστοχία δεν παρουσιάστηκε ένδειξη κάποιας θλιπτικής αστοχίας σκυροδέματος και υπέρβαση της κρίσιμης θλιπτικής παραμόρφωσης του διαγώνιου θλιπτήρα, κάτι το οποίο ωστόσο θεωρείται βασικός μηχανισμός αστοχίας αυτών των φορέων, σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Απεναντίας, ένας βασικός μηχανισμός που φαίνεται να αμελείται εν μέρει από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι η αστοχία των οριζόντιων διεπιφανειών με διατμητικούς συνδέσμους και εν προκειμένω η διατμητική αστοχία της διεπιφάνειας τοιχώματος-βάσης. Διαπιστώθηκε ότι το δοκίμιο Α8 επιτυγχάνει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητά του μετά την επίτευξη της μέγιστης ικανότητας των διατμητικών συνδέσμων της κάτω διεπιφάνειας σε δράση βλήτρου και επίσης μετά την διαρροή κάποιων εξ αυτών.

Παρά την ανάπτυξη υψηλών τιμών της σχετικής ολίσθησης και αποκόλλησης μεταξύ τοιχώματος και περιβάλλοντος πλαισίου και βάσης στο μέγιστο φορτίο, παρατηρήθηκε ότι η σύνδεση μεταξύ τοιχώματος και πλαισίου διατηρήθηκε σε κάποιο βαθμό λόγω της παρουσίας

των «μακρικών» βλήτρων, τα οποία όντας επαρκώς αγκυρωμένα (σύμφωνα με τους ελληνικούς κανονισμούς) δύνανται να εξαντλήσουν την φέρουσα ικανότητά τους χωρίς να πραγματοποιηθεί εξόλκευση.

Το προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ. φαίνεται ότι υποεκτιμά την μέγιστη φέρουσα ικανότητα, πιθανότατα λόγω λανθασμένης ιεράρχησης των μηχανισμών αστοχίας, καθώς εκτιμάται ότι ο διαγώνιος θλιπτήρας του τοιχώματος παραλαμβάνει μεγαλύτερη δύναμη από την πραγματική και δεν λαμβάνει υπόψη του (υποεκτιμά) την δυνατότητα μεταφοράς διατμητικής δύναμης κυρίως στις οριζόντιες διεπιφάνειες. Ο FEMA 306 προβλέπει την αστοχία θλιπτήρα ως τη κρίσιμη μορφή αστοχίας του φατνώματος, ωστόσο οι πειραματικές μετρήσεις δεν υποστηρίζουν την εμφάνιση της απαιτούμενης δύναμης για να συμβεί αυτό.

Το μοντέλο «shear-beam» των Fiorato et al. φαίνεται να εκτιμά με ικανοποιητική ακρίβεια την αρχική δυσκαμψία του συστήματος, λόγω της υπόθεσης μεγάλου βαθμού μονολιθικότητας, ενώ το μοντέλο του ισοδύναμου διαγώνιου θλιπτήρα μπορεί να εκτιμήσει ικανοποιητικά την επιβατική δυσκαμψία του συστήματος στη συμβατική διαρροή και στη μέγιστη φέρουσα ικανότητα.

Παρατηρήθηκε ότι σε κανένα από τα τέσσερα συγκρινόμενα δοκίμια (A4, A6, A7 και A8) δεν αναπτύχθηκε στο τοίχωμα διαγώνια δύναμη ικανή να προκαλέσει σύνθλιψη σκυροδέματος, ενώ η πιο εκτεταμένη ρηγμάτωση εμφανίστηκε μόνο στο τοίχωμα των δοκιμίων A7 και A8.

Γενικά, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών που μελετήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι σε «ασθενή» πλαίσια Ο/Σ χωρίς μέριμνα για πλάσιμη συμπεριφορά (κατασκευές προ του 1985) με εμφανιζόμενα τοιχώματα Ο/Σ, η αστοχία είναι πιο πιθανό να συμβεί σε τμήμα του πλαισίου και όχι στο τοίχωμα. Επίσης, σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η ενίσχυση των υποστυλωμάτων με κλειστό μανδύα Ο/Σ, που σκυροδετείται ταυτόχρονα με το τοίχωμα, είναι φανερά πιο ευεργετική στην αύξηση της μέγιστης φέρουσας ικανότητας, αρχικής δυσκαμψίας και πλαστιμότητας σε σχέση με την ενίσχυση με απλό γέμισμα και τοποθέτηση διατμητικών συνδέσμων περιμετρικά στις διεπιφάνειες. Η ίδια διαφορά διαφαίνεται και στην δυνατότητα των δοκιμίων να απορροφήσουν ενέργεια. Το δοκίμιο A7 απορροφά συνολικά τη διπλάσια ενέργεια σε σχέση με τα δοκίμια A4, A8. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι η επιλογή της ενίσχυσης των υποστυλωμάτων με μανδύα Ο/Σ αποτελεί μια αποτελεσματική λύση.

Παρά την αντιμετώπιση των πλαισίων με εμφαννόμενο τοίχωμα από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. ως κατεξοχήν ψαθυρών, λόγω της διατμητικής λειτουργίας τους, παρατηρείται ότι εν τέλει είναι ικανά να επιδείξουν μία μη αμελητέα πλαστιμότητα. Αυτό πρακτικά υποδηλώνει ότι μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου δεν υπάρχει απότομη πτώση απόκρισης, αλλά αυτή γίνεται με χαμηλό ρυθμό, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα φορτίου-μετακίνησης των δοκιμών.

Διαπιστώθηκε ότι οι διατμητικοί σύνδεσμοι στην περίπτωση της εμφάντωσης πλαισίου με τοίχωμα Ο/Σ, εκτός από βλήτρα λειτουργούν ταυτόχρονα και ως αγκύρια κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση, γεγονός που καθιστά ενδεχομένως ανεπαρκές το προτεινόμενο μήκος έμπηξης, $8d_b$ («κοντά βλήτρα»). Για την μεγαλύτερη ενεργοποίηση του τοιχώματος συνιστάται να χρησιμοποιούνται διατμητικοί σύνδεσμοι με μήκος έμπηξης μεγαλύτερο του $8d_b$, και έτσι θα αυξηθεί η φέρουσα ικανότητά τους σε δράση αγκυρίου και θα συμμετέχουν περισσότερο στην ανάληψη δυνάμεων λόγω των καμπτικών ροπών.

Τέλος, ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι το γεγονός ότι το δοκίμιο Α8 επέδειξε μια εξαιρετική συμπεριφορά, η οποία προσεγγίζει την αντοχή του δοκιμίου Α7 με τα ενισχυμένα υποστυλώματα, με εμφαννόμενο τοίχωμα Ο/Σ αρκετά χαμηλότερης αντοχής σε σχέση με αυτό του περιβάλλοντος πλαισίου. Δηλαδή, ένα «αδύναμο» πλαίσιο με εμφαννόμενο τοίχωμα Ο/Σ χαμηλότερης αντοχής μπορεί να επιδείξει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή που αναμένεται στην συνήθη περίπτωση εμφάντωσης ενισχυμένου πλαισίου με τοίχωμα Ο/Σ ίσης ή μεγαλύτερης αντοχής. Επομένως, είναι μια οικονομικότερη ενίσχυση πλαισίου και με καλύτερη αξιοποίηση διαθέσιμων πόρων. Θα είχε ενδιαφέρον η πραγματοποίηση δοκιμής πλαισίου ενισχυμένο με εμφαννόμενο τοίχωμα Ο/Σ ακόμη χαμηλότερης θλιπτικής αντοχής.

Κρίνεται ότι χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση των βασικών μηχανισμών με τους οποίους το ενισχυμένο πλαίσιο οδηγείται στην αστοχία, καθώς και διερεύνηση άλλων σεναρίων ενίσχυσης, με τα οποία να μπορεί να αξιοποιηθεί στο έπακρο η αντοχή του φανώματος. Μια πιο εκτεταμένη μελέτη επί του συνόλου των πειραματικών δοκιμών του παρόντος ερευνητικού προγράμματος αποτελεί το αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής του κύριου Θεοχάρη Παπαθεοχάρη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ACI, 1995, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Report ACI 318-95, Detroit, Michigan.
- [2] Altin, S., Ersoy, U., & Tamkut, T. (1992). Hysteretic response of reinforced-concrete infilled frames. *J. of Struct. Eng., ASCE*, 118(8), pp. 2133-2150.
- [3] Amato, G., Cavaleri, L., Fossetti, M., & Papia, M. (2008, October). Infilled frames: influence of vertical loads on the equivalent diagonal strut model, *Proc. of the 14th World Conf. on Earthquake Eng., Beijing, China*.
- [4] Aoyama, H., Kato, D., Katsumata, H., & Hosokawa, Y. (1984). Strength and behavior of post-cast shear walls for strengthening of existing R/C buildings. *Proc. of 8th World Conf. on Earthquake Eng., Vol. 1*, pp. 485-492.
- [5] Applied Technology Council. (1998). FEMA 306. Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings: Basic procedures manual - Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
- [6] Canadian Standards Association. (2004). Design of concrete structures. CSA S304.1-04, Mississauga, Ontario Canadian Standards Association.
- [7] Chrysostomou, C. Z., Kyriakides, N., Kotronis, P., Poljanšek, M., Taucer, F., Roussis, P., & Kosmopoulos, A. (2012, September). Seismic retrofitting of RC frames with RC infilling. *Proc. of 15th World Conf. on Earthquake Eng., Lisbon*.
- [8] Fardis, M. N., & Panagiotakos, T. B. (1997). Seismic design and response of bare and infilled reinforced concrete buildings. Part II: Infilled structures. *J. of Earthquake Eng., 1(03)*, pp. 475–503.
- [9] Fiorato, A. E., Sozen, M. A., & Gamble, W. L. (1970). An investigation of the interaction of reinforced concrete frames with masonry filler walls. Univ. of Illinois, Eng. Experiment Station, College of Eng., Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, USA.

- [10] Holmes, M. (1961). Steel frames with brickwork and concrete infilling. *Proc. of the Inst. of Civil Engrs.*, 19(4), pp. 473-478.
- [11] Kara, M. E., & Altin, S. (2006). Behavior of reinforced concrete frames with reinforced concrete partial infills. *ACI Struct. J.*, 103(5), 701.
- [12] Koutromanos, I., Kyriakides, M., Stavridis, A., Billington, S., & Shing, P. B. (2012). Shake-table tests of a 3-story masonry-infilled RC frame retrofitted with composite materials. *J. of Struct. Eng., ASCE*, 139(8), pp. 1340-1351.
- [13] Mainstone, R. J. (1971). On the stiffnesses and strengths of infilled frames. *Proc. Inst. of Civil Engrs. Suppl. (iv), Inst. of Civil Struct. Eng., ASCE*, 92(1), pp. 381-403.
- [14] Mehrabi, A. B., Benson Shing, P., Schuller, M. P., & Noland, J. L. (1996). Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames. *J. of Struct. Eng., ASCE*, 122(3), 228-237.
- [15] Moretti, M. L., Papatheocharis, T., & Perdikaris, P. C. (2014). Design of reinforced concrete infilled frames. *J. of Struct. Eng., ASCE*, 140(9).
- [16] Oesterle, R. G., Fiorato, A. E., Johal, L. S., Carpenter, J. E., Russell, H. G., & Corley, W. G. (1976). Earthquake resistant structural walls-tests of isolated walls, Report to National Science Foundation, Skokie, Illinois.
- [17] Papia, M., Cavaleri, L., & Fossetti, M. (2003). Infilled frames: Developments in the evaluation of the stiffening effect of infills, *Struct. Eng. and Mechs.*, 16(6), pp. 675-694.
- [18] Park, R. (1988, August). Ductility evaluation from laboratory and analytical testing. *Proc. of the 9th World Conf. on Earthquake Eng.*, Vol. 8, Tokyo-Kyoto, Japan, pp. 605-616.
- [19] Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*, Wiley, New York.
- [20] Priestley, M. J. N. (1996). Displacement-based seismic assessment of existing reinforced concrete buildings, *Bulletin-New Zealand Nat. Society for Earthquake Eng.*, 29, pp. 256-272.

- [21] Rasmussen B.H. (1962). Strength of transversely loaded bolts and dowels cast into concrete, Laboratoriet for Bygningastatik. Denmark Technical University, Meddelelse, Vol. 34, No 2.
- [22] Saneinejad, A & Hobbs, B. (1995), Inelastic design of infilled frames, J. of Struct. Eng., ASCE, 121(4), pp 634-650.
- [23] Stafford Smith, B., & Carter, C. (1969). A method of analysis for infilled frames, Proc. of the Inst. of Civil Engrs., 44(1), pp. 31-48.
- [24] Tassios, T. P., & Vassilopoulou, I. (2003). Shear transfer capacity along a RC crack under cyclic sliding. Proc. of fib Symposium “Concrete Structures in Seismic Regions”, Athens.
- [25] Tassios, T. P., & Vintzeleou, E. N. (1987). Concrete-to-concrete friction. J. of Struct. Eng., ASCE, 113(4), pp. 832-849.
- [26] Yoichi Higashi, T. E., Ohkubo, M., & Shimizu, Y. (1980). Experimental study on strengthening reinforced concrete structure by adding shear wall. Proc. of the World Conf. on Earthquake Eng., Turkey, Vol. 7, pp. 173-180.
- [27] ΕΚΩΣ 2000, Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000, Δεκέμβριος, 1999, Αθήνα.
- [28] Ευρωκώδικας 2 (2004, Οκτώβριος). Σχεδιασμός φορέων από σκυρόδεμα. Μέρος 1-1: Γενικοί Κανόνες και Κανόνες για κτίρια.
- [29] ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2012). Κανονισμός Επεμβάσεων, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, Αθήνα.
- [30] Περδικάρης Φ., Μωρέττη Μ., Παπαθεοχάρης Θ. (2012). Διερεύνηση της Συμπεριφοράς Πλαισίων Ο.Σ. Ενισχυμένων με Εμφατνούμενα Τοιχώματα Ο.Σ., Έκθεση ερευνητικού προγράμματος στον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.